

Martin Zoppoth

**Substitution von Stählen durch Kunststoffe,
dargestellt an ausgewählten Beispielen
aus dem Maschinenbau**

eingereicht als

DIPLOMARBEIT

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

im Studiengang Maschinenbau

Röthis, 2009

Erstprüfer: Hr. Prof. Dr.-Ing.habil Jürgen Spindler

Zweitprüfer: Hr. Prof. Dr.-Ing. F. Müller

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am:

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	II
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IV
TABELLENVERZEICHNIS	VI
1 EINFÜHRUNG IN DIE THEMATIK	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Zielsetzungen	3
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 ALLGEMEINES ZU KUNSTSTOFFEN	5
2.1 Geschichte der beschriebenen Kunststoffe	5
2.2 Einteilung der Kunststoffe	7
2.2.1 Thermoplasten	7
2.2.2 Duroplaste	10
2.2.3 Elastomere	11
2.3 Zusatzstoffe	12
2.3.1 Additive	12
2.3.2 Weichmacher	12
2.3.3 Stabilisatoren	13
2.3.4 Füllstoffe	14
2.3.5 Verstärkungsstoffe (Faserverbund)	15
2.4 Eigenschaften	20
2.4.1 Dichte und Festigkeit	20
2.4.2 Chemische Beständigkeit	20
2.4.3 Niedrige Verarbeitungstemperaturen	22
2.4.4 Niedrige Leitfähigkeiten	23
2.5 Aspektverhältnis	23
2.6 Liste der Kunststoffe der Beispiele	24
2.7 Unverstärkte Kunststoffe	25
3 BEISPIELE AUS DER PRAXIS	26
3.1 Beispiel 1: Kunststoff-Propeller zur Unterstützung von Segelbooten bei der Einfahrt in den Hafen (Bugstrahlruder)	26
3.1.1 Erläuterungen zum Projekt	26
3.1.2 Anforderung an das Material PA 6 GF 30	27
3.1.3 Materialien allgemein	28

3.1.4	Kenngößen für PA 6 GF 30	29
3.1.5	Funktionsbeschreibung allgemein.....	31
3.1.6	Ausführung	31
3.1.7	Funktionsbeschreibung Bugstrahlruder.....	33
3.2	Beispiel 2: Wassertank für Feuerwehrfahrzeuge aus Kunststoff	36
3.2.1	Erläuterungen zum Projekt	36
3.2.2	Funktionsbeschreibung	36
3.2.3	Bisher verwendete Materialien.....	36
3.2.4	Materialbeschreibung	37
3.3	Beispiel 3: Zahnräder aus Kunststoff	43
3.3.1	Erläuterungen zum Projekt	43
3.3.2	Bisher verwendete Materialien.....	43
3.3.3	Einsatz von Kunststoffen für Zahnräder	44
3.3.4	Arten von Verzahnungen	46
3.4	Beispiel 4: Flugzeugtragflächen aus Kunststoff	56
3.4.1	Erläuterungen zum Projekt	56
3.4.2	Materialbeschreibung	60
3.5	Beispiel 5: Rechen für Turbineneinlauf aus Kunststoff.....	62
3.5.1	Funktionsbeschreibung	62
3.5.2	Bisher verwendetes Material.....	63
3.5.3	Kunststoffeinsatz	63
3.5.4	Komponentenbeschreibung	64
4	UMWELTPROBLEMATIK.....	71
4.1	Rohstoffliche Verwertung.....	71
4.2	Gesundheitsgefahren	72
5	SCHLUSSFOLGERUNGEN	73

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Welt-Kunststoffverbrauch 2000 bis 2010 p.a. in Mio. Tonnen (Quelle: BASF AG 2009)	3
Abb. 2: Strukturformel von Polyethylen (PE) (Quelle: Domininghaus 2005, S. 66)	5
Abb. 3: Strukturformel von Polyamid (PA) (Quelle: Erhard 2004, S. 76)	5
Abb. 4: Strukturformel von Polyoxymethylen (POM) (Quelle: Erhard 2004, S. 77)	6
Abb. 5: Strukturformel von Polyphenylensulfid (PPS) (Quelle: Erhard 2004, S. 79)	6
Abb. 6: Amorphe und teilkristalline Strukturen von Thermoplasten (Quelle: Svařák Magazin 2009)	7
Abb. 7: Schematische Darstellung des Temperaturverlaufs des Torsionsmoduls und des mechanischen Verlustfaktors amorpher Thermoplasten (Quelle: Erhard 2004, S. 66)	8
Abb. 8: Schematische Darstellung des Temperaturverlaufs des Torsionsmoduls und des mechanischen Verlustfaktors teilkristalliner Thermoplasten (Quelle: Erhard 2004, S. 67)	9
Abb. 9: Spannungsdehnungsdiagramm von PA 6 (trocken) bei verschiedenen Temperaturen (Quelle: Domininghaus 205, S. 921)	9
Abb. 10: Spannungsdehnungsdiagramm von Fortron 1140 L4 (40 Masse-% Glasfaser) bei verschiedenen Temperaturen (Quelle: Domininghaus 2005, S. 1190)	9
Abb. 11: Kunststofftüten, ein typisches Produkt aus Polypropylen oder Polyethylen (Quelle: Wikipedia 2008)	10
Abb. 12: Tretboote haben typischerweise einen Duroplast-Rumpf (Quelle: Wikipedia 2008)	11
Abb. 13: Elastisches Gummiband (Quelle: Wikipedia 2008)	12
Abb. 14: Einfluss von Füll- und Verstärkungsstoffen auf das Eigenschaftsbild von Kunststoffen (Quelle: Domininghaus 2005, S. 198)	14
Abb. 15: Glasfaser: Struktur, REM-Aufnahme (Quelle: Ehrenstein 2006, S. 19)	15
Abb. 16: C-Faser, Mikrostruktur und REM-Aufnahme (Quelle: Ehrenstein 2006, S. 39)	15
Abb. 17: Kettenorientierungen (Quelle: Ehrenstein 2006, S. 31)	16
Abb. 18: Geschnittene Aramidfaser mit starkem Spleißen an der Bruchstelle, REM-Aufnahme (Quelle: Ehrenstein 2006, S. 31)	16
Abb. 19: BMW H2R mit Außenhaut aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (Quelle: Wikipedia 2008)	20
Abb. 20: Beständigkeit einiger Kunststoffe (Quelle: Domininghaus 2005, S. 115)	22
Abb. 21: Beispiel für ein Spritzgussteil (Quelle: Firma Kern GmbH 2008)	25
Abb. 22: Beispiel für eine mechanische Fertigung eines Kunststoffteiles (Quelle: Firma Kern GmbH 2008)	25
Abb. 23: 2-flügeliger Festpropeller (Quelle: Wikipedia 2008)	32
Abb. 24: Verstellpropeller (Quelle: Wikipedia 2008)	32
Abb. 25: 3-D Ansicht des Propellers (Vorderansicht) (Quelle: Firma Hager Kunststoffe GmbH)	33
Abb. 26: 3-D Ansicht des Propellers (Seitenansicht) (Quelle: Firma Hager Kunststoffe GmbH)	34
Abb. 27: Konstruktionszeichnung des Propellers (für 1,8 kW) (Quelle: Firma Hager Kunststoffe GmbH)	34
Abb. 28: Konstruktionszeichnung des Propellers (für 3,0 kW) (Quelle: Firma Hager Kunststoffe GmbH)	35

Abb. 29: Schnittdarstellung eines Kunststoffwassertanks (Quelle: Firma Hager Kunststoffe GmbH)	41
Abb. 30: Konstruktionszeichnung für den Kunststoffwassertank (Quelle: Firma Hager Kunststoffe GmbH)	42
Abb. 31: Elektrolysekanal (Quelle: Firma Hans Künz GmbH)	43
Abb. 32: Stirnräder aus Kunststoff (Quelle: Wikipedia 2008)	46
Abb. 33: Kegellrad aus Kunststoff (Quelle: Wikipedia 2008)	47
Abb. 34: Schneckengetriebe aus Kunststoff (Quelle: Wikipedia 2008)	48
Abb. 35: Zahnstange aus Kunststoff (Quelle: Wikipedia 2008)	48
Abb. 36: Konstruktionszeichnung eines Zahnstangenantriebs (Quelle: Firma Kern GmbH 2008)	49
Abb. 37: Konstruktionszeichnung einer Triebstockverzahnung (Quelle: Firma Kern GmbH 2008)	49
Abb. 38: Konstruktionszeichnung eines Strinrads (Quelle: Firma Hans Künz GmbH)	49
Abb. 39: Beispiele für verschiedene Zahnradtypen (Quelle: Firma Kern GmbH 2008)	50
Abb. 40: Wichtigste Verbundwerkstoffanwendungen im A380 (Quelle: Domininghaus 2005, S. 192)	56
Abb. 41: Flugzeugtragflächen (Quelle: Boeing Company 2008)	57
Abb. 42: Abbildung von möglichem Treibgut (Quelle: Firma Hans Künz GmbH 2008)	62
Abb. 43: Kunststoffrechen – Komponentenbeschreibung (Quelle: eigene Darstellung)	65
Abb. 44: Abbildung eines Stahlrechens nach zehn Jahren Gebrauch (Quelle: Firma Hans Künz GmbH 2008)	65
Abb. 45: Abbildung einer Strömung (Quelle: Firma Hydrothane Systems)	66
Abb. 46: Abbildung eines Kunststoffrechens (Quelle: Firma Hydrothane Systems)	66
Abb. 47: Abbildung eines Rechens aus Stahl (Quelle: Firma Hans Künz GmbH 2008)	67
Abb. 48: Abbildung von täglich angeschwemmtem Treibgut (Quelle: Firma Hans Künz GmbH 2008)	69
Abb. 49: Konstruktionszeichnung Turbineneinläufe mit Darstellung des Rechens (Quelle: Firma Hans Künz GmbH 2008)	70
Abb. 50: Verschmutzung eines Rechens durch Kunststoffabfälle (Quelle: Firma Hans Künz GmbH 2008)	72

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Kunststoffübersicht (Quelle: Wikipedia 2008)	24
Tab. 2: Übersicht unverstärkte Kunststoffe (Quelle: Wikipedia 2008)	25
Tab. 3: Materialbeschreibung zu PA 6 GF 30 (Quelle: Firma Kern GmbH 2009).....	31
Tab. 4: Materialbeschreibung zu Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) (Quelle: Firma Kern GmbH 2009)	40
Tab. 5: Allgemeine Kennwerte S235JRG (Quelle: eigene Angaben)	40
Tab. 6: Stoffrelevante Kennwerte S235JRG (Quelle: eigene Angaben).....	40
Tab. 7: Materialbeschreibung zu Polyethylen ultrahochmolekular (PE-UHMW) (Quelle: Firma Kern GmbH 2009)	51
Tab. 8: Materialbeschreibung zu Polyamid 6 (PA 6) (Quelle: Firma Kern GmbH 2009)	53
Tab. 9: Materialbeschreibung zu Polyoxymethylen Copolymer (POM-C) (Quelle: Firma Kern GmbH 2009)	55
Tab. 10: Polyphenylensulfid mit 40 % Glasfaser (PPS GF 40) (Quelle: Firma Kern GmbH 2009) .	61
Tab. 11: Materialbeschreibung zu Polyamid 66 (Quelle: Firma Kern GmbH 2009).....	69

1 Einführung in die Thematik

1.1 Einleitung

In meiner Arbeit werde ich anhand von fünf konkreten Anwendungsbeispielen den Einzug des Kunststoffes in Fertigungsbereiche aufzeigen, in denen bisher Metalle als die einzig verwendbaren Materialien galten. Metalle bekommen allerdings in immer mehr Bereichen Konkurrenz durch den vergleichsweise jungen Werkstoff Kunststoff. Schon lange als Standard, wird Kunststoff im Haushalt und im Automobilbau eingesetzt; z.B. das Gehäuse des Fernsehers, der Umluftpropeller im Küchenherd, sowie manches Bauteil im Staubsauger oder im Motorraum des Autos sind aus Kunststoff. Die heute starke Präsenz von Kunststoffen liegt in ihren vielfältigen Vorteilen begründet.

Beim Einsatz eines neuen Werkstoffes sind an diesen im Wesentlichen folgende Erwartungen geknüpft:

- Gewichtsreduktion
- Kostenreduktion bei Produktion
- Korrosionsbeständigkeit
- Verbesserung der Eigenschaften des Produktes (z.B. im Flugzeugbau: Weniger Gewicht bedeutet weniger Treibstoffverbrauch aber auch bessere Gleiteigenschaften, sowie höhere Zuladung)
- Geringerer Wartungsaufwand (z.B. an Getrieben)
- Kürzere Standzeiten der Produktionsmaschinen
- Höhere Flexibilität bei Formgebung
- Kürzere Lieferzeiten
- Hoher Automatisierungsgrad bei Serienprodukten
- Lange Lebensdauer
- Hohe/gleiche Belastbarkeit bei geringerem Gewicht gegenüber Stahl

Die Erfahrung mit dem Werkstoff Kunststoff zeigt, dass dieser die oben genannten Punkte weitgehend erfüllen kann. Zum einen ist der Kostenfaktor ausschlaggebend: Die Dichte der meisten Kunststoffe liegt bei ca. $0,9 - 2 \text{ g/cm}^3$, diejenige von Stahl bei ca. 8 g/cm^3 . Die geringere Dichte des Kunststoffs hilft erheblich an Gewicht zu sparen. Denn obwohl z.B. der Kunststoff PE-HD ca. 7,35 €/kg kostet und ein Kilogramm Stahl S235JRG zurzeit bei ca. 0,65 €/kg liegt, ergeben sich geringere Kosten durch das geringere Einsatzgewicht.

Hinzu kommt, dass Produkte aus Kunststoff meist günstig sind. Das liegt wiederum in erster Linie an der stark gestiegenen Produktivität der verarbeitenden Kunststoffindustrie.

Zum anderen ist es ihre Vielfalt an vorteilhaften Materialeigenschaften, die sie notwendig und unentbehrlich machen, wie z.B. elektrische Isolation oder Leitfähigkeit bzw. nicht Magnetisierbarkeit, insbesondere Korrosionsbeständigkeit.

Kunststoffe haben im Allgemeinen keine hohe Festigkeit, deshalb werden für hochbeanspruchte Bauteile fast ausschließlich Faserverbundkunststoffe verwendet (vgl. Kapitel 2.3.5), die durch Zugabe von Glasfasern, Kohlefasern oder Aramidfasern in ihrer Festigkeit nahe an diejenige des Stahles kommen. Denn es ist vor allem die Kombination „leicht und korrosionsresistent“, die von der Industrie sehr häufig nachgefragt wird. Das Hochleistungspolymer Polyphenylensulfid (PPS) beispielsweise kann mit herausragenden Eigenschaften glänzen. Es kann bei einer Dauertemperatur von 240°C eingesetzt werden, es hat eine geringe Wärmedehnung und eine hohe chemische Beständigkeit (genaue Daten vgl. Tab. 10) und ist deshalb von den Entwicklern im Fahrzeug- und Flugzeugbau immer öfter das Material der Wahl.

Zusammenfassend sprechen folgende Vorteile für den Einsatz von Kunststoff:

- Gewichtsreduktion von Bauteilen
- Beinahe unbegrenzte Formgebungsmöglichkeiten
- Geringe Standzeiten der Maschinen
- Einfache Serienproduktion durch Spritzgussverfahren
- Korrosionsresistent
- Bedingte chemische Beständigkeit
- Reduktion von Herstellungskosten
- Elektrisch isolierend
- Nicht Magnetisierbar (außer durch Beimengung von Metall als Füllstoff)
- Hohe Elastizität

Organisationen und Unternehmen im Kunststoffbereich sprechen der Produktion von Kunststoff eine rasante Entwicklung zu. Laut der *PlasticsEurope* Deutschland e.V. wurden im Jahr 2007 weltweit 260 Millionen Tonnen Kunststoff produziert. Davon kamen 8 % aus Deutschland und 25 % aus Europa. Nach aktuellen Prognosen wird der Kunststoff-Verbrauch weltweit weiter steigen: Bis 2015 rechnet man mit einer Steigerung des Pro-Kopf-Verbrauchs um jährlich 5 %. Wichtige Wachstumsmärkte sind Osteuropa und Südostasien (vgl. Abb. 1).

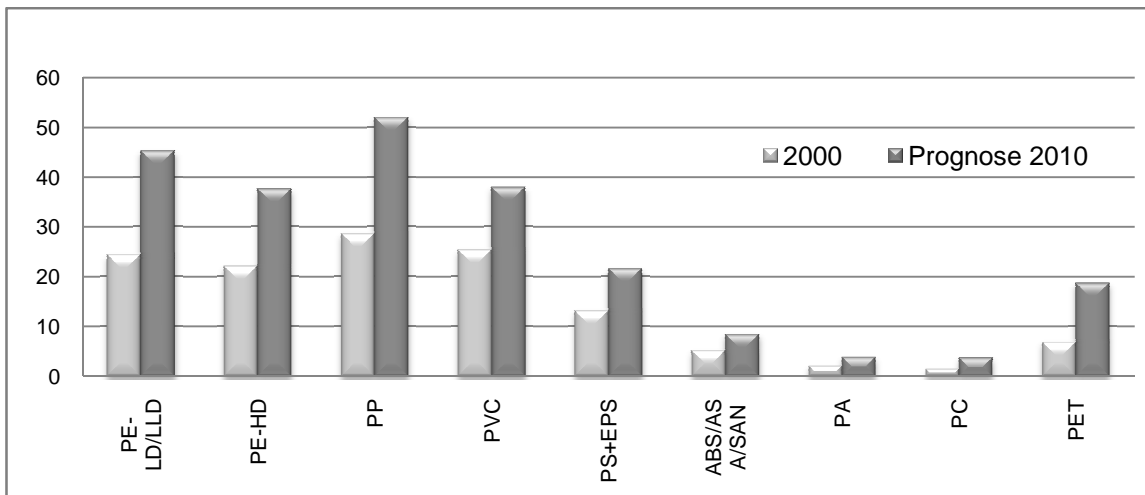


Abb. 1: Welt-Kunststoffverbrauch 2000 bis 2010 p.a. in Mio. Tonnen (Quelle: BASF AG 2009)

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit dem Metallbereich, der von Kunststoffen erobert wird. Es soll aber auch erwähnt werden, dass Kunststoffe sukzessive auch andere Materialien wie z.B. Leder, Baumwolle, Glas, Holz etc. ersetzen. Die Kunststoffbranche gilt deshalb als Innovationstreiber und im zunehmenden Maße als Werkstoff des 21. Jahrhunderts.

1.2 Zielsetzungen

Die Hauptzielsetzung dieser Arbeit ist es, anhand der ausgewählten Beispiele aufzuzeigen, dass der Kunststoff im Maschinenbau mittlerweile eine ebenso tragende Rolle einnimmt wie Stahl. Weiters soll aufgezeigt werden, dass bei diesem Material die konstruktiven und Bearbeitungsgrenzen noch lange nicht ausgereizt sind, wodurch die Anwendung ein hohes Potential für interessante Weiter- bzw. Neuentwicklungen besitzt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit besteht aus insgesamt fünf Kapiteln, wobei Kapitel eins und zwei einen theoretischen Bezugsrahmen herstellen sollen. Kapitel eins besteht aus einer kurzen Einführung in die Thematik, mit welcher sich die Arbeit auseinandersetzt. In Kapitel zwei wird Grundsätzliches zum Werkstoff Kunststoff wie Grundbegriffe, Historie, Eigenschaften, sowie die Einteilung der Kunststoff-Übergruppen erläutert. Der Abschluss dieses Kapitels bildet eine Liste der in dieser Arbeit näher erläuterten Kunststoffe.

Kapitel drei stellt den praxisorientierten Teil dar. In diesem werden folgende fünf Praxisbeispiele erörtert:

- Beispiel 1: Kunststoff-Propeller zur Unterstützung von Segelbooten bei der Einfahrt in den Hafen (Bugstrahlruder) (Kunststoffmaterial: PA 6 GF 30)
- Beispiel 2: Wassertank für Feuerwehrfahrzeuge aus Kunststoff (Kunststoffmaterial: PE-HD (Schwarz))
- Beispiel 3: Zahnräder aus Kunststoff (Kunststoffmaterial: PE-UHMW, PA 6 und POM)
- Beispiel 4: Flugzeugtragflächen aus Kunststoff (Kunststoffmaterial: PPS GF 40)
- Beispiel 5: Rechen für Turbineneinlauf aus Kunststoff (Kunststoffmaterial: PE-HD, PA 66)

In Kapitel vier wird näher auf die Umweltproblematik eingegangen, die sich durch den massiven Einsatz von Kunststoffen ergibt. Im letzten Kapitel fünf werden die Schlussfolgerungen präsentiert.

2 Allgemeines zu Kunststoffen

2.1 Geschichte der beschriebenen Kunststoffe

Polyethylen (PE)

- Die Strukturformel dazu lautet:

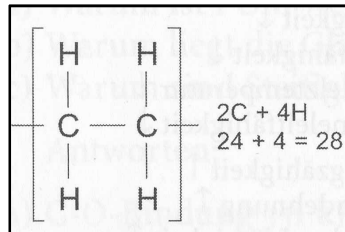


Abb. 2: Strukturformel von Polyethylen (PE)
(Quelle: Domininghaus 2005, S. 66)

Polyethylen wurde im Jahr 1933 durch Zufall von Eric W. Fawcett und Reginald O. Gibson (beide Forscher bei der britischen Firma ICI Imperial Chemical Industries) bei dem Versuch Ethylen und Benzaldehyd unter hohem Druck reagieren zu lassen entdeckt. 1939 erfolgte die erste Kleinserienproduktion dieses Kunststoffes. 1979 wurden Ultrahochfeste Fasern (UHMW-PE) durch Paul Smith und Piet J. Lemstra entdeckt. Dieser Kunststoff findet seine bekannteste Anwendung im Verpackungsmaterial.

Polyamide (PA)

- Die Strukturformel dazu lautet:

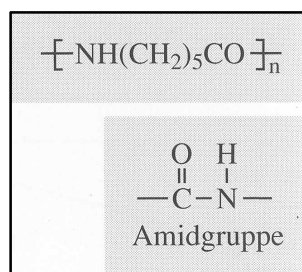


Abb. 3: Strukturformel von Polyamid (PA)
(Quelle: Erhard 2004, S. 76)

1934 wurde die Polymer-Theorie durch Werner Kuhn aufgestellt. 1935 erfolgte durch die Synthese von Polyamiden durch Wallace H. Caothers die erste Herstellung von vollsynthetischen Polymerfasern. 1939 konnte die kommerzielle Produktion dieses

Kunststoffes beginnen. Die bekannteste Anwendung des Polyamids ist PA 6.6 Nylon (Damenstrumpfhosen).

Polyoxymethylen (POM)

- Die Strukturformel dazu lautet:

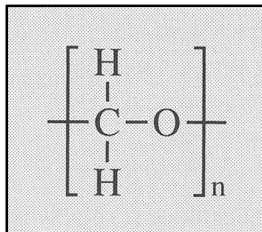


Abb. 4: Strukturformel von Polyoxymethylen (POM)
(Quelle: Erhard 2004, S. 77)

1959 konnte Polyoxymethylen im technischen Maßstab hergestellt werden. Die bekannteste Anwendung ist das Gasfeuerzeug.

Polyphenylensulfid (PPS)

- Die Strukturformel dazu lautet:

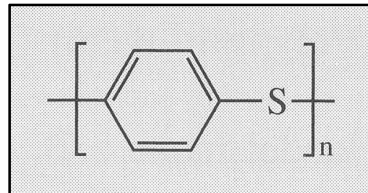


Abb. 5: Strukturformel von Polyphenylensulfid (PPS)
(Quelle: Erhard 2004, S. 79)

Das Polyphenylensulfid wurde ab 1968 von der Phillips Petroleum Company unter dem Handelsnamen Ryton hergestellt. 1973 wurden bereits 3.000 Tonnen pro Jahr in Borger (Texas) produziert.

2.2 Einteilung der Kunststoffe

Kunststoffe lassen sich in **drei Hauptgruppen** einteilen:

- **Thermoplasten**
- **Duroplasten**
- **Elastomere**

2.2.1 Thermoplasten

Thermoplasten sind aus verzweigten oder linearen Makromolekülen aufgebaut. Sie weisen eine amorphe Struktur auf, das sind reglose Anordnungen von Polymerketten, oder eine teilkristalline Struktur, das sind sowohl regelmäßig aufgebaute Makromoleküle als auch amorphe Strukturen.

Die Verarbeitung thermoplastischer Kunststoffe geschieht aus einer pulvrigen oder granulierten Rohstoff-Form, bis hin zum Fertigteil oder Halbzeug vorwiegend über den Schmelzzustand.

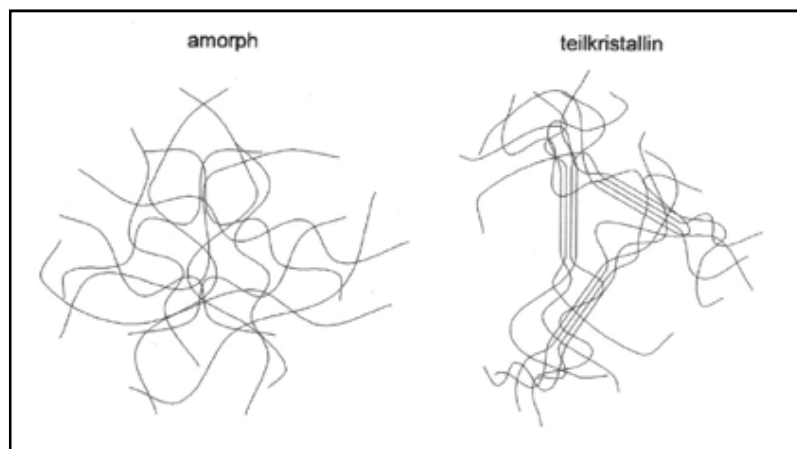


Abb. 6: Amorphe und teilkristalline Strukturen von Thermoplasten (Quelle: Svařák Magazin 2009)

Amorphe Thermoplasten

Die Polymerwerkstoffe reagieren bei „tiefen Temperaturen“ auf mechanische Beanspruchung energieelastisch (metallelastisch). Es kommt zu reversiblen Abstandsänderungen von Atomen und Valenzwinkelverschiebungen. Bei Zufuhr von thermischer Energie wird ein polymerspezifischer Erweichungsbereich erreicht. Dieser Bereich wird durch die Glasübergangstemperatur T_g gekennzeichnet (vgl. Abb. 7). Über der Glasübergangstemperatur können sich Seitengruppen und Kettensegmente umlagern und schaffen atomare und molekulare Rotationsmöglichkeiten. Großvolumige Seitengruppen

behindern allerdings diese Bewegungen. Einer Deformation der ursprünglichen Knäuelstruktur unter mechanischem Einfluss wirken Rückstellkräfte entgegen. Dies verleiht dem Polymerwerkstoff in diesem Temperaturbereich ein entropieelastisches Verhalten. Bei weiterer Zuführung von thermischer Energie (Temperaturerhöhung) wird die Kettenbeweglichkeit weiter erhöht, so dass die Ketten aneinander vorbeigleiten können. Der Werkstoff ist nun irreversibel verformbar, da er nun in einem schmelzflüssigen Zustand ist. Diese Schmelzviskosität η (eine mechanische Größe) nimmt bei zunehmender Temperatur ab. „Die mit zunehmender Temperatur dargestellten Überführungen vom energieelastischen in den entropieelastischen Zustand und in den schmelzflüssigen Zustand sind mit abnehmender Temperatur theoretisch beliebig wiederholbar. Praktisch wird jedoch bei häufiger Wiederholung ein Kettenabbau erfolgen, verbunden mit einer Abnahme der Werkstoffzähigkeit“ (Erhard 2004, S. 66).

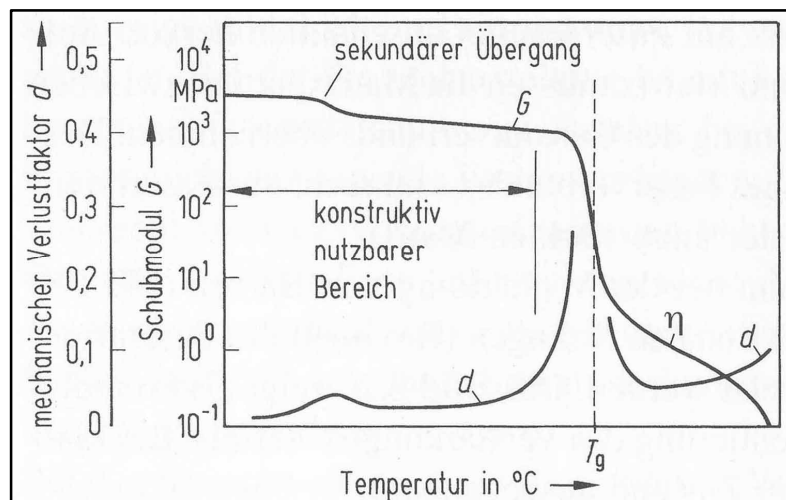


Abb. 7: Schematische Darstellung des Temperaturverlaufs des Torsionsmoduls und des mechanischen Verlustfaktors amorpher Thermoplasten (Quelle: Erhard 2004, S. 66)

Teilkristalline Thermoplasten

Unter der Glasübergangstemperatur haben die teilkristallinen Werkstoffe die gleichen Eigenschaften wie amorphe Thermoplasten. Bei Überschreiten der Glasübergangstemperatur T_g gehen zuerst die amorphen Gefügeteile in den entropieelastischen Zustand über. Der kristalline Bereich behält seinen energieelastischen Charakter (vgl. Abb. 8).

Bei Erreichen der T_g Temperatur tritt ein Modulabfall ein, der umso stärker ausgeprägt ist, je geringer der Kristallinitätsgrad ist. Bei weiterer Zufuhr von thermischer Energie wird der Kristallitschmelzpunkt T_m (Potential-Schwelle) erreicht. Im Gegensatz zu amorphen Thermoplasten wird der Bereich zwischen T_g und T_m als konstruktiver Bereich genutzt, da hier ausreichend Steifigkeit und hohe Zähigkeit vorliegt.

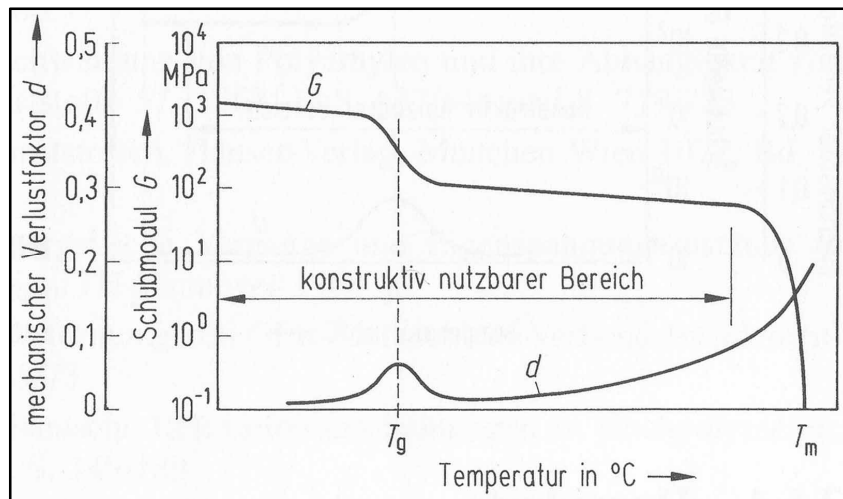


Abb. 8: Schematische Darstellung des Temperaturverlaufs des Torsionsmoduls und des mechanischen Verlustfaktors teilkristalliner Thermoplasten (Quelle: Erhard 2004, S. 67)

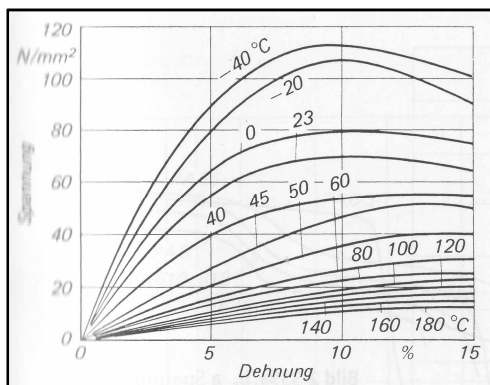


Abb. 9: Spannungsdehnungsdiagramm von PA 6 (trocken) bei verschiedenen Temperaturen (Quelle: Domínguez 2005, S. 921)

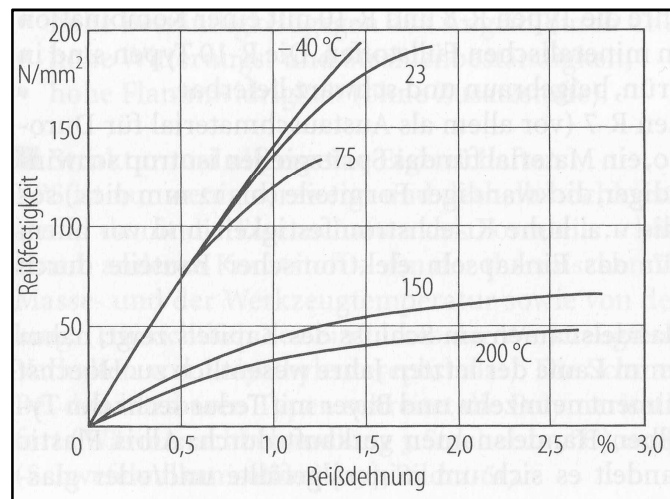


Abb. 10: Spannungsdehnungsdiagramm von Fortron 1140 L4 (40 Masse-% Glasfaser) bei verschiedenen Temperaturen (Quelle: Domínguez 2005, S. 1190)

Thermoplasten haben eine geringe Zugfestigkeit. Beispielsweise hat Polyamid 6 ein E-Modul von nur 1.200 N/mm², Polyethylen niedriger Dichte sogar nur ein E-Modul von 210 N/mm². Durch Zusatzstoffe wie z.B. Faserverbunde wird das E-Modul um ein Vielfaches erhöht. Hier wäre PA 6 GF 30 zu nennen, welches durch Zusatz von 30 % Glasfaser ein E-Modul von 5.500 N/mm² erreicht.



Abb. 11: Kunststofftüten, ein typisches Produkt aus Polypropylen oder Polyethylen
(Quelle: Wikipedia 2008)

2.2.2 Duroplaste

Duroplaste sind Polymere, die in einem Härtingsprozess aus einem Harz oder einer Lösung der Komponenten durch eine Vernetzungsreaktion hervorgehen. Diese irreversible Reaktion wird meist durch Erhitzen bewirkt (daher auch der englische Fachterminus *thermosets*), kann aber auch durch Oxidationsmittel, energiereiche Strahlung oder Einsatz von Katalysatoren initiiert bzw. beschleunigt werden. Eine Erwärmung von Duroplasten führt nicht zu einer plastischen Verformbarkeit, sondern lediglich zu deren Zersetzung. Ausgehärtete Duroplaste sind meist hart und spröde, sowie im weitergehenden Fertigungsprozess nur noch mechanisch bearbeitbar.

Wegen ihrer mechanischen und chemischen Beständigkeit auch bei erhöhten Temperaturen werden sie häufig für Elektroinstallationen verwendet. Einer der verbreitetsten und ältesten Kunststoffe dieser Klasse ist Bakelit. In diese Gruppe fallen auch ungesättigte Polyester (PES), Polyurethanharze für Lacke und Oberflächenbeschichtungen und praktisch alle Kunstharze wie beispielsweise Epoxide.

Anwendungsgebiete

Duroplaste finden Anwendung in folgenden Industrieprodukten:

- Motorraumanwendungen (Wasserpumpengehäuse, Bremskolben, Riemenscheiben, Kommutatoren etc.)
- Schutzhelme (z.B. Feuerwehrhelm)
- Kabelbahnen (Ebo)
- Leistungs- und Leitungsschutzschalter
- Karosserieteile

- Reflektoren (z.B. Autoscheinwerfer)
- Haushalt (z.B. Bügeleisenhitzeschild, Topfgriffe und Herdleisten)

Ein weiteres Anwendungsgebiet war früher die Karosserieaußenhaut des Pkw Trabant. Heutzutage werden zahlreiche Baugruppen aus Metall im Automobil-Motorraum durch Duroplast-Bauteile substituiert.



Abb. 12: Tretboote haben typischerweise einen Duroplast-Rumpf
(Quelle: Wikipedia 2008)

2.2.3 Elastomere

Zu den Elastomeren gehören alle Arten von vernetztem Kautschuk. Die Vernetzung erfolgt beispielsweise durch Vulkanisation mit Schwefel, mittels Peroxiden, Metalloxiden oder Bestrahlung. Die Elastomere sind weitmaschig vernetzt und daher flexibel. Sie werden beim Erwärmen nicht weich und sind nicht löslich. Daher werden sie für Hygieneartikel oder Chemikalienhandschuhe verwendet. Die Gummimischung von Autoreifen ist ebenfalls ein Elastomer, das seine Eigenschaften durch Vulkanisation erhält.

Beispiele für Elastomere sind Naturkautschuk (NR), Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (NBR), Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR), Chloropren-Kautschuk (CR), Butadien-Kautschuk (BR) und Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM).

Ursache der Elastizität ist überwiegend die Fähigkeit der geknäulten Polymerketten, auf eine Zugbelastung mit einer Streckung bzw. Entflechtung der Ketten zu reagieren. Nach Abfall der Zugbelastung relaxieren die Ketten wieder in ihren statistisch bevorzugten knäuelartigen Zustand zurück. Dieses Phänomen äußert sich durch ein Strecken unter Zugspannung und das anschließende Zusammenziehen nach Abfall der Spannung. Um ein Aneinandervorbeigleiten der Ketten unter der Zugbelastung zu vermeiden, werden die Ketten bei Gummi durch Schwefelbrücken untereinander verbunden. Beim Zusatz von viel

Schwefel bei der Vulkanisation entsteht somit Hartgummi, bei der Zugabe von wenig Schwefel Weichgummi.

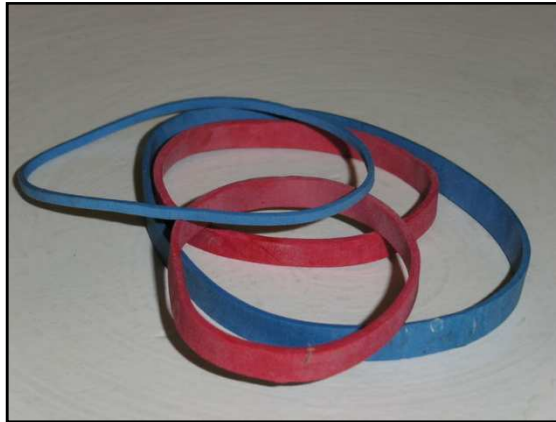


Abb. 13: Elastisches Gummiband (Quelle: Wikipedia 2008)

2.3 Zusatzstoffe

2.3.1 Additive

Kunststoffen werden im Verlauf des Herstellungsprozesses sogenannte Additive zugesetzt (*Compoundierung*). Sie dienen der genauen Einstellung der Materialeigenschaften auf die Bedürfnisse der jeweiligen Anwendung und der Verbesserung der chemischen, elektrischen und mechanischen Eigenschaften. Solche mit Zuschlagsstoffen versehene Formmassen werden nach DIN EN ISO 1043 (Thermoplaste) und nach DIN 7708 (Duroplaste) gekennzeichnet.

2.3.2 Weichmacher

Weichmacher dienen allgemein dazu, um die Härte und die Sprödigkeit von Polymeren herabzusetzen. Es gibt zwei Möglichkeiten dies zu erreichen: die innere Weichmachung und die äußere Weichmachung.

Die innere Weichmachung wird hauptsächlich durch Copolymerisation zweier Monomere, deren Glasübergangstemperatur weit auseinander liegen, erreicht.

Die äußere Weichmachung ist ein Quellvorgang, bei dem der Weichmacher (niedermolekular) von den Polymeren durch Nebenvalenzkräfte gebunden wird. Zum Beispiel ist Feuchtigkeit ein Weichmacher bei hydrophilem Polyamid. Trotz starker Dipolkräfte ist dies keine chemische Reaktion. Unter den Weichmachern wird zwischen Primär- und Sekundärweichmachern unterschieden. Primärweichmacher haben die

Eigenschaft gut zu gelieren und werden nicht ausgeschwitzt. Sekundärweichmacher werden hauptsächlich in Verbindung mit Primärweichmachern verwendet. Diese gelieren nur mäßig und dienen zur Verminderung der Migrationstendenz, zur Kältefestigkeit und zur Extraktionsbeständigkeit.

Fast drei Fünftel der hergestellten Additive sind Weichmacher. Bis vor wenigen Jahren war Diethylhexylphthalat (DEHP) (Synonym: Dioctylphthalat DOP) der am häufigsten verwendete Weichmacher. Dieser stellte sich jedoch als umwelt- und gesundheitsschädlich heraus, weshalb die europäische Industrie inzwischen weitgehend auf seinen Einsatz verzichtet.

Extender verbessern ebenfalls die Verarbeitbarkeit und ersetzen immer häufiger die Weichmacher, da diese günstiger in der Herstellung sind. Wichtige Extender sind epoxidierte Öle, hochsiedende Mineralöle und Paraffine.

2.3.3 Stabilisatoren

Stabilisatoren dienen der Verbesserung der chemischen Eigenschaften. Sie erhöhen die Lebensdauer des Kunststoffes und schützen ihn vor schädigenden Einflüssen (Oxidation, Strahlung und Wärme bzw. Feuer) in seinem Einsatzgebiet.

Circa 70 % der weltweit 850.000 t/a (im Jahre 2001) produzierten Stabilisatoren werden in PVC eingesetzt. Auch werden immer öfters organische Verbindungen statt schwermetallhaltige Stabilisatoren eingesetzt, obwohl deren Herstellung aufwendiger und teurer ist. Das Mengenverhältnis Blei zu alternativen Systemen beträgt allerdings immer noch ca. 4:1. Dies obwohl Skandinavien und die Benelux-Länder auf bleihaltige Stabilisatoren verzichten und auch die Autoindustrie seit 2003 kontinuierlich auf bleifreie Kabel umstellt. Die beste Alternative zu Blei sind zurzeit Stabilisatoren auf Calcium-Zink-Basis.

Durch Reaktion mit Luftsauerstoff kann sich der Kunststoff verfärben und die Polymerketten können sich zersetzen oder neu vernetzen. Um vor Oxidation zu schützen werden meist Stabilisatoren wie p-Phenyldiamine eingesetzt. Diese sind zwar auch stark verfärbend, jedoch gänzlich ohne eine Oxidation zu bewirken.

Einen sehr wichtigen Bereich umfassen die UV-Stabilisatoren. Kunststoffe, die im Freien eingesetzt oder fluoreszierendem Licht ausgesetzt werden, erfahren physikalisch-chemische Vorgänge, die ihre mechanischen Eigenschaften verschlechtern, sowie den Glanzverlust und die Verfärbung des Kunststoffes bewirken. Der Grad der Schädigung hängt von der Lichtempfindlichkeit, Art der Zusatzstoffe, Wanddicke, sowie Intensität und Wellenbereich des UV-Lichtes ab. Schutzüberzüge wie Lack, Metall, Radikalfänger oder Quencher (Löcher) können den photochemischen Prozess verzögern. Für PE-HD eignet sich die Nickelchelate. Sterisch gehinderte Amine (HALS) ist ein niedermolekularer Typ, der

zwischenzeitlich durch hochwirksame polymere Typen ergänzt wurde. Die HALS bewährt sich äußerst gut bei Polyofinen und dem oxidationsempfindlichen PP, selbst bei Folien oder Fasern.

„Von dem großen Sortiment an Lichtschutzmittel können nur wenige bei einer Vielzahl von Kunststoffen optimal eingesetzt werden. Daraus resultiert das Bestreben, für eine Reihe von Kunststoffarten beziehungsweise deren verschiedenen Typen anwendungsspezifische UV-Stabilisatoren zur Verfügung zu stellen und so den erfolgreichen Einsatz der Kunststoffe für einen immer breiter gefächerten Markt zu ermöglichen“ (Domininghaus 2005, S. 171).

2.3.4 Füllstoffe

Füllstoffe werden hauptsächlich als Streckmittel, die so die Herstellung des Kunststoffes verbilligen, verwendet. Klassische Füllstoffe sind z.B. Holzmehl, Zinkstearat, Flammschutzmittel, Kreide, Sand, Kieselgur, Glasfasern und -kugeln, Zinkoxid, Quarz, Holzmehl, Stärke, Graphit, Ruße und Talkum etc. Wobei die Differenzierung zwischen Füllstoffen und Verstärkungstoffen nicht immer leicht fällt, da manche Füllstoffe bestimmte Eigenschaften des Kunststoffes sogar verstärken, wie z.B. Druckfestigkeit, elektrische Leitfähigkeit beziehungsweise elektrisch isolierend.

	Glasfasern	Wollastonit	C-Fasern	Whiskers	Synthesefasern	Cellulose	Glimmer	Talkum	Graphit	Sand-/Quarzpulver	Silica	Kaolin	Glaskugeln	Calciumcarbonat	Metalloxide	Ruß
Zugfestigkeit	++		+	+	-		+	0								
Druckfestigkeit	+						+	+		+			+	+		
E-Modul	++	++	++	+			++	+		+	+		+	+	+	+
Schlagzähigkeit	- +	-	-	-	++	+	- +	-		-	-	-	-	- +	-	+
reduzierte thermische Ausdehnung	+			+			+	+		+	+	+			+	
reduzierte Schwindung	+	+	+				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
bessere Wärmeleitfähigkeit		+	+					+	+	+	+			+	+	+
bessere Wärmestandfestigkeit	++	+	++				+	+				+		+	+	+
elektrische Leitfähigkeit			+						+							+
elektrischer Widerstand		+					++	+			+	++			+	
Wärmebeständigkeit		+					+	+		+	+	+			+	+
chemische Beständigkeit		+					+	0	+			+	+		+	+
besseres Abriebverhalten			+				+	+	+			+				
Extrusionsgeschwindigkeit	- +						+					+		+		
Abrasion in Maschinen	-			0	0	0		0	0	-			0	0		0
Verbilligung	+	+				+	+	+	+	++	+	+	+	++		
	faserförmige Füllstoffe und Verstärkungsmittel					plättchen- förmige Typen				kugelige Füllstoffe						
++ starke Wirkung, + schwächere Wirkung, 0 ohne Wirkung, - negative Wirkung.																

Abb. 14: Einfluss von Füll- und Verstärkungsstoffen auf das Eigenschaftsbild von Kunststoffen
(Quelle: Domininghaus 2005, S. 198)

2.3.5 Verstärkungsstoffe (Faserverbund)

Unter Verstärkungsstoffe versteht man in Kunststoffen eingesetzte anorganische oder organische Zusatzstoffe, die die Kunststoffmatrix verstärken. Um eine Verstärkung zu erzielen müssen folgende Voraussetzungen erfüllt werden (Erhard 2004, S. 97):

- Der Verstärkungsstoff muss eine geometrische Vorzugsrichtung haben; i.a. eindimensional, faserförmig mit ausreichender Faserlänge
- Ein kritischer Mindestfasergehalt muss überschritten sein.
- Festigkeit und Steifigkeit des Verstärkungstoffes müssen größer sein als die der Matrix; dagegen muss die Matrixdehnung größer sein als die der Faser, um die Faserfestigkeit voll auszunutzen.
- Eine optimale Bindung zwischen Matrix und Verstärkungsmaterial muss gegeben sein.

Folgende Verstärkungsstoffe werden hauptsächlich eingesetzt:

1.) Glasfasern

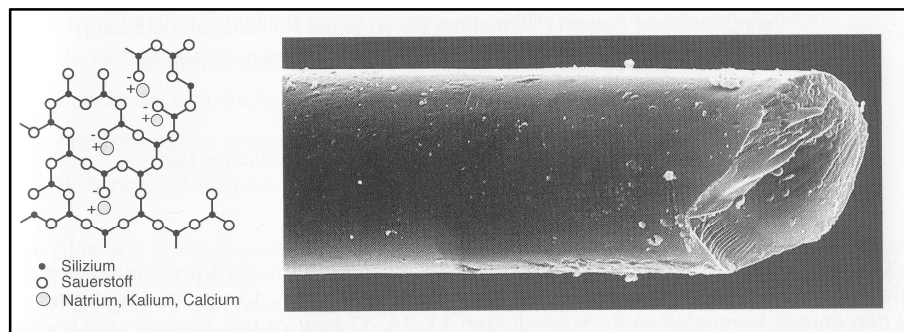


Abb. 15: Glasfaser: Struktur, REM-Aufnahme (Quelle: Ehrenstein 2006, S. 19)

2.) Kohlenstoff-Fasern

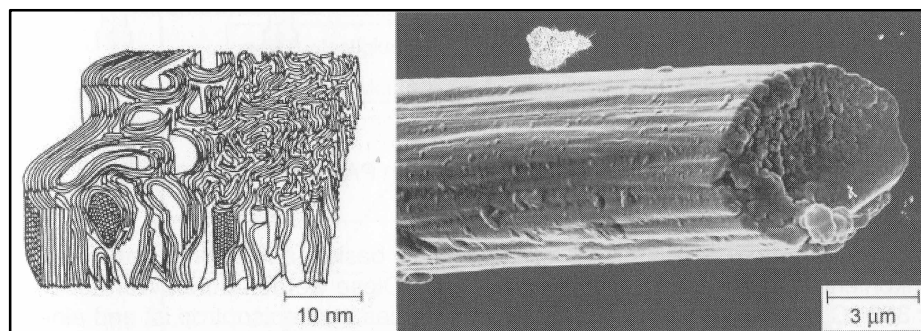


Abb. 16: C-Faser, Mikrostruktur und REM-Aufnahme (Quelle: Ehrenstein 2006, S. 39)

3.) Organische Aramidfasern

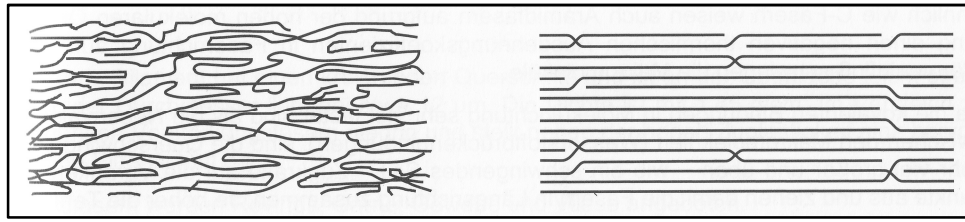


Abb. 17: Kettenorientierungen (Quelle: Ehrenstein 2006, S. 31)

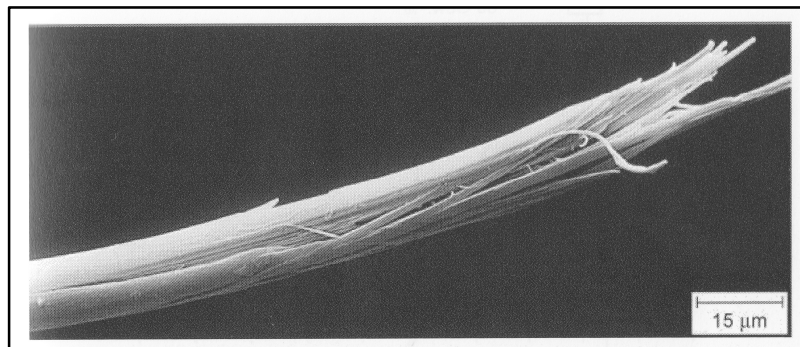


Abb. 18: Geschnittene Aramidfaser mit starkem Spleißen an der Bruchstelle, REM-Aufnahme (Quelle: Ehrenstein 2006, S. 31)

Folgende Verstärkungsstoffe werden eher selten eingesetzt, da ihre Herstellung wirtschaftlich nicht immer sinnvoll ist:

- 4.) Borfasern
- 5.) Beryllium
- 6.) Stahlfasern
- 7.) Whisker
- 8.) kurzfaserförmige Einkristalle auf Basis von Al_2O_3

Textilglasfasern ist ein Sammelbegriff für Glasfasern. Die pulverförmigen Ausgangsstoffe (SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 , CaO , MgO) werden mittels Direktschmelzverfahren bei ca. 1300°C durch Ziehdüsen mit 3.000 bis 4.000 m/min zu Fäden von 9 bis 17 µm Durchmesser gezogen. Unmittelbar danach werden diese Filamente parallel angeordnet und zu einem Spinnfaden zusammengefasst und mit einer sogenannten Schlichte z.B. Gleitmittel, Netzmittel, polymerspezifische Haftvermittler etc. überzogen. Die daraus entstehenden Garne werden zu Geweben, Bändern und Flechtartikeln weiterverarbeitet.

Durch ihr hohes E-Modul (E-Glas 73.000 N/mm^2) und trotzdem geringe Dichte (E-Glas $2,6 \text{ g/cm}^3$) sind die Glasfasern ein sehr beliebter Verstärkungstoff.

Für Gießharze (Duroplasten) werden hauptsächlich Roving, Matten, Rovinggewebe,

Glasfilamentgewebe, bei Thermoplasten werden Kurzglasfasern (bis 0,22 mm lang) und Langglasfasern (bis 5 mm lang) verwendet.

Besondere Eigenschaften von Glasfasern sind (Ehrenstein 2006, S. 29f):

- Glasfasern sind isotrop.
- Das E-Modul von Glasfasern ist ungefähr so groß wie der von Aluminium und ein Drittel von Stahl, die Zugfestigkeit übertrifft die der meisten organischen und anorganischen Faserstoffe und liegt teilweise bedeutend höher als die von Stahl. Durch die vergleichsweise geringe Dichte $\rho = 2,5 \text{ g/cm}^3$ ergeben sich besonders hohe gewichtsbezogene Festigkeitswerte.
- Textilglas lässt sich bis zum Bruch um ca. 3 % dehnen. Die Dehnung ist dabei nahezu elastisch, das heißt Textilglas hat nicht wie andere synthetische Faserstoffe ein viskoelastisches Verhalten.
- Die thermischen Eigenschaften übertreffen die der anderen Textilfasern. Selbst Dauerbeanspruchungen bis 250°C mindern die mechanischen Eigenschaften nicht. Demgegenüber ist die Wärmeleitfähigkeit größer als bei anderen Faserstoffen, jedoch wesentlich geringer als bei Metallen.
- Textilglas ist unbrennbar und deshalb feuersicher. Es eignet sich für Verbundstoffe und Vorhänge. Der Erweichungspunkt von E-Glas liegt oberhalb von 625°C.
- Glasfasern haben einen niedrigeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten als die meisten Konstruktionswerkstoffe.

Kohlenstoff-Fasern (*carbon fiber*) werden aus Polyacrylnitril-Faser (PAN-Fasern) hergestellt. Zuerst werden die PAN-Fasern bei 200°C bis 300°C in oxidierender Atmosphäre in eine Leiterpolymerstruktur umgewandelt. Danach unter Intertatmosphäre und ca. 1.000°C bis 1.300°C erfolgt die „Carbonisierung“. Das heißt, die Fasern „verkohlen“ ohne zu schmelzen und bestehen danach aus ca. 90 % Kohlenstoff. Diese Fasern haben einen sehr hohen E-Modul bis zu 500.000 N/mm² aber eine sehr geringe Bruchdehnung bis zu 1,27 %.

Kohlenstoff-Fasern werden hauptsächlich als Verstärkungsstoffe für Duroplasten eingesetzt, bei Thermoplasten (hauptsächlich Polyamide) werden ausschließlich kurze C-Fasern im Spritzgussverfahren verwendet.

Besondere Eigenschaften von C-Fasern sind (Ehrenstein 2006, S. 41f):

- C-Fasern haben im Gegensatz zu den Kunststoffen ein progressives Spannungs-Dehnungs-Verhalten, das heißt mit zunehmender Belastung steigt das E-Modul;
- Hochfest und hochsteif bis zu Temperaturen von 500°C;
- Außerordentlich korrosionsbeständig (unbeständig nur gegen starke Oxidationsmittel);
- Gut elektrisch und thermisch leitend;
- Als Implantat körpverträglich (künstliches Hüftgelenk);
- C-Fasern sind im Gegensatz zu Glasfasern stark anisotrop;
- Die Anisotropie erstreckt sich auch auf die Wärmeausdehnungskoeffizienten, die in Faserrichtung und quer dazu sehr unterschiedlich sind;
- C-Fasern sind normalerweise äußerst spröde und bei der Verarbeitung knickempfindlich. Deshalb ist für die Verarbeitung ein Oberflächenschutz nötig, hierfür verwendet man ein „Sizing“ - ein Epoxidharzgemisch - als Schutzmittel für die Verarbeitung und Haftmittel für den Verbund mit dem Haftmaterial;
- Guter Strahlendurchgang, keine Radarreflexion;
- Nachteil: bei langer Lagerung härtet diese Oberflächenschicht aus; die Fasern werden unflexibel;
- Bemerkenswert: die C-Faser selbst ist fast dauerschwingfest; die dynamischen Eigenschaften der Lamine sind besser als die aller anderen Werkstoffe;
- Trotz hoher Brennbarkeit zu 90 % aus C bestehenden Fasern langsamer Abbrand im Verbund.

Aramidfasern, auch Kevlar genannt, sind organische Synthesefasern auf Basis eines aromatischen Polyamids (Polyphenylenterephthalamid PPTA). Da die Schmelztemperatur des PPTA über der Zersetzungstemperatur liegt, ist ein Faserspinnen aus der Schmelze nicht möglich. Daher wird eine 20 %-Lösung in konzentrierter Schwefelsäure zu hochkristallinen Fasern mit starker Moleküllorientierung versponnen. Diese Fasern haben einen sehr hohen E-Modul (theoretisch bis zu 200.000 N/mm²) bisher wurden nur 186.000 N/mm² erreicht.

Besondere Eigenschaften der Aramidfasern sind (Ehrenstein 2006, S. 33ff):

- Leichteste Verstärkungsfasern, $\rho = 1,45 \text{ g/cm}^3$, hohe gewichtsbezogene Zugfestigkeit;
- Aramidfaser ist stark anisotrop, das heißt die Werkstoffeigenschaften in Faserrichtung unterscheiden sich von denen quer zur Faser. So ist z.B. das E-Modul senkrecht zur Faser viel kleiner als in Faserrichtung, ähnlich verhält es sich mit den

Festigkeiten;

- Die Druckfestigkeit in Faserrichtung ist deutlich niedriger als die Zugfestigkeit. Bei der Konstruktion von Bauteilen aus aramidfaserverstärktem Kunststoff (AFK) ist auf diese Druckempfindlichkeit in Faserrichtung besonders zu achten. Aramidfaser-Kunststoffe-Verbindungen eignen sich sehr gut für zugbeanspruchte Leichtbauteile, aber nicht für Leichtbauteile, die vorwiegend Biege- oder Druckbeanspruchung erfahren;
- Aramidfasern neigen zur Feuchtigkeitsaufnahme (bis 7 %). Die Feuchtigkeit beeinträchtigt die Haftung zwischen Faser und Matrix. Die Fasern müssen vor Gebrauch getrocknet werden. Die Feuchtigkeitsaufnahme beeinflusst nicht nur die Haftung zwischen der Faser und Matrix, sondern auch die Festigkeit der Faser selbst;
- Aramidfasern reagieren auf energiereiche Strahlung (zum Beispiel UV-Licht) mit einem deutlichen Festigkeitsabfall;
- Aramidfasern sind als organische Fasern nicht besonders temperaturfest, im Verbund mit Kunststoff bis 300°C, schmelzen jedoch nicht, sind daher für feuerfeste Schutzkleidung geeignet;
- Glasübergangstemperatur $T_g = 300^\circ\text{C}$, Zersetzungstemperatur $T_z = 480^\circ\text{C}$;
- Die Haftung der Aramidfaser ist oft weniger gut als die anderer Fasern;
- Die Schlichte hat auf verschiedene Matrixsysteme eine weichmachende Wirkung; im Zweifelsfall müssen die Fasern mit organischen Lösungsmitteln gereinigt werden;
- Ausgehärtete Bauteile aus AFK lassen sich schlecht spanend bearbeiten.

2.4 Eigenschaften

Kunststoffe zeichnen sich, verglichen mit keramischen oder metallischen Werkstoffen, durch eine Reihe von außergewöhnlichen Eigenschaften aus:



Abb. 19: BMW H2R mit Außenhaut aus carbonfaserverstärktem Kunststoff
(Quelle: Wikipedia 2008)

2.4.1 Dichte und Festigkeit

Die Dichte der meisten Kunststoffe liegt zwischen $0,9$ und $2,0 \text{ g/cm}^3$. Sie sind damit erheblich leichter als Metalle (ca. 8 g/cm^3). Durch die geringe Dichte können an Bauteilen bis zum 8-fachen des Gewichtes gespart werden.

In Bezug auf die mechanischen Eigenschaften sind Kunststoffe anderen Werkstoffklassen häufig unterlegen. Das E-Modul von Polyamidfaser liegt bei ca. 5.000 N/mm^2 bei Stahl bei ca. 210.000 N/mm^2 . Die Zugfestigkeit von Polyamidfasern liegt nur bei 1.700 N/mm^2 bei Stahl bei ca. 4.000 N/mm^2 . Um das E-Modul und die Zugfestigkeit zu erhöhen, werden Verstärkungsstoffe (vgl. Kapitel 2.3.5) verwendet. Trotz Verstärkungsstoffen werden die Werte von Stahl selten erreicht, daher werden Bauteile mit höheren Wandstärken versehen. Dies ist nur solange sinnvoll, als das Bauteil leichter ist als aus Stahl. Denn das Gewicht ist eines der Hauptargumente für den Einsatz von Kunststoff. Obwohl die Festigkeiten vergleichsweise niedrig sind, brechen Kunststoffteile weniger leicht als beispielsweise Keramik oder Glas. Sie weisen zumeist eine gute Zähigkeit auf. Deshalb werden Gebrauchsgegenstände für Kinder und Spielzeug vielfach aus Kunststoff gefertigt.

2.4.2 Chemische Beständigkeit

Werden die physikalischen Eigenschaften der Kunststoffe vor allem von ihrem morphologischen Aufbau bestimmt, so hängt das chemische Verhalten wesentlich von der chemischen Struktur der Makromoleküle ab. Die Thermoplasten sind überwiegend gegen

Säuren und Laugen beständig, die Duroplasten vor allem gegen organische Lösemittel. Die Beständigkeit gegen Chemikalien entscheidet bei allen Anwendungen zum Beispiel in der Verpackungsindustrie, der Medizin und im Automobilbau über die allgemeine Verwendbarkeit. Eine erste Abschätzung kann häufig anhand der Regel „Ähnliches greift Ähnliches chemisch an“ getroffen werden. Polare Kunststoffe werden von polaren wässrigen Lösungen und von polaren organischen Flüssigkeiten angegriffen. Zu den polaren Thermoplasten gehören zum Beispiel PMMA, PC und PA. Unpolare Kunststoffe werden dagegen von unpolaren Flüssigkeiten angegriffen. So wird z.B. das unpolare PE von Benzin angequollen, während PS von Benzol und Toluol sogar völlig aufgelöst wird.

Zum Vergleich: Metalle sind beständig gegen organische Lösungsmittel, Öle, Fette, Tenside. Unbeständig gegen Elektrolyte und Korrosion (Abtrag, Gefügelockerung, Spannungsrisskorrosion). Kunststoffe sind beständig gegen Elektrolyte (Säuren), bedingt beständig gegen organische Lösemittel, Öle, Fette, Tenside (dies ist stark kunststoffspezifisch), unbeständig gegen chlorierte Kohlen-Wasserstoffe (Halogen). Auswirkungen je nach Kunststoff kann Lösen beziehungsweise Quellen und Spannungsrissbildung sein.

Die Chemiebeständigkeit von Kunststoffen wird in Beständigkeitstabellen dargestellt.

Medien Kunst- stoffe												
	Wasser kalt	Wasser heiß	Säuren schwach	Säuren stark	Oxidierende Säuren	Flußsäure	Laugen schwach	Laugen stark	Lösungen anorg. Salze	Halogene trocken	Aliphatische KW	Chlorierte KW
PE-LD	+		+	b	-	b	+	+	+	-	+	b
PE-HD	+	+	+	+	-	b	+	+	+	-	+	b
PP	+	+	+	b	-	b	+	+	+	b	+	+
PVC hart	+	b	+	+	b	b	+	+	+	b	+	+
PVC weich	+	b	+	-	-	-	+	-	+	-	-	-
PS	+	+	+	b	-	b	+	+	+	-	-	+
ABS	+	+	+	b	-	b	+	+	+	-	+	+
POM	+	+	b	-	-	-	+	+	+	-	+	+
PTFE	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
PA 6	+	b	-	-	-	-	+	b	+	-	+	b
PC	+	b	+	b	b	b	-	-	b	+	+	b
PET	+	-	+	b	b	+	b	-	+	+	+	+
PBT	+	-	b	-	b	+	+	+	+	+	b	+

Medien Kunst- stoffe												
	Ester	Ketone	Ether	Aldehyde	Amine	Organische Säuren	Aromatische KW	Kraftstoffe	Mineralköl	Fette, Öle	Ungesättigte chlor. KW	Terpentin
PE-LD	b	b	-			+	-	-	b	b	-	-
PE-HD	+	+	b	b	+	+	b	b	+	+	-	-
PP	b	b	-	+	+	b	b	-	+	+	-	-
PVC hart	-	-	-	-	b	b	-	-	+	+	-	-
PVC weich	-	-	-	+	+	b	-	-	b	b	-	-
PS	-	-	-	-	+	b	-	-	b	+	-	-
ABS	-	-	-	-	+	+	-	+	+	+	-	-
POM	-	b	+	b	b	+	b	+	+	+	+	+
PTFE	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
PA 6	+	+	+	b	+	b	+	+	+	-	b	b
PC	b	b	-	-	-	b	-	b	+	+	-	+
PET	+	+	+			+	+	+	+	+	b	b
PBT	b	-	+			b	b	+	+	+	b	b

+ = beständig b = bedingt beständig - = unbeständig.

Abb. 20: Beständigkeit einiger Kunststoffe (Quelle: Domininghaus 2005, S. 115)

2.4.3 Niedrige Verarbeitungstemperaturen

Die gängigen Verarbeitungstemperaturen für Kunststoffe liegen im Bereich von 250 bis 300°C. Während Metalle bei hohen Temperaturen aufwändig gegossen werden müssen und Einschränkungen bezüglich der Gussformen bestehen, lassen sich aus Thermoplasten auch kompliziertere Formteile mit vergleichsweise geringem Aufwand fertigen. Gleichzeitig können in einem Verarbeitungsschritt Additive, wie Farbpigmente oder Fasern, in das

Material eingearbeitet werden, die sich bei den hohen Temperaturen des Metallgießens oder des Sinterns von Keramik zersetzen würden.

2.4.4 Niedrige Leitfähigkeiten

Die Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen liegt deutlich unter der von Metallen. Daher werden viele Kunststoffe, vor allem Schaumstoffe, als Dämmstoffe eingesetzt.

Die elektrische Leitfähigkeit von Kunststoffen ist um 15 Größenordnungen kleiner als die von Metallen. So werden viele Kunststoffe zur Isolation von elektrischen Leitungen und Kabeln eingesetzt.

2.5 Aspektverhältnis

Zum Füllen und Verstärken von Thermoplasten werden Zusatzstoffe stark unterschiedlicher Form verwendet. Der für die mechanischen Eigenschaften des Verbundes bedeutsame Formfaktor ist definiert als das Verhältnis seiner Länge zu seiner Dicke (L/D-Verhältnis). Kugelförmige und kubische Partikel haben einen Formfaktor von 1. Beispiele sind Glaskugeln oder Calciumcarbonat.

Fasern oder andere anisotrope plättchenförmige Füllstoffe können sehr hohe Formfaktoren aufweisen und diese liegen meist deutlich über 100.

Plättchenförmige Verstärkungsstoffe, zu denen Schichtsilikate wie Talk und Glimmer zählen, liegen meist zwischen 5 und 50.

Verstärkungsstoffe mit hohem L/D-Verhältnis versteifen Polymermatrizen in der Regel stärker als Füllstoffe mit geringerem Aspektverhältnis.

Plättchenförmige Verstärkungsstoffe weisen zwar meist ein geringeres E-Modul wie faserförmige Verstärkungsstoffe auf, erhöhen aber das E-Modul trotzdem beträchtlich. Ein wesentlicher Vorteil der teilchenförmigen Verstärkungsstoffe ist, dass die Endeneigenschaften des Kunststoffbauteiles durch die Teilchenform nahezu isotrop, also richtungsunabhängig sind. Durch das Aspektverhältnis zwischen 5 und 50 sind plättchenförmige Verstärkungsstoffe, wie beispielsweise Talkum eine sehr gute Lösung, um Kunststoffe zu verstärken, gleichzeitig jedoch die Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften nicht allzu sehr negativ zu beeinflussen.

Die Eigenschaftsverbesserung durch Verstärkungsstoffe betrifft beispielsweise:

- die Erhöhung des E-Moduls
- die Erhöhung der Biegefestigkeit
- die positive Beeinflussung des Schwindungsverhaltens
- die Verbesserung des Kriechverhaltens
- oder die Erhöhung der Wärmeformbeständigkeit.

Einsatz findet Talkum als Verstärkungsstoff beispielsweise bei der Verstärkung von Polyolefinen, wie HDPE oder PP, für einen vielseitigen Einsatz in der Auto- oder Bauindustrie. Verstärkte Polypropylencompounds sind seit ca. 30 Jahren auf dem Markt. Ende der 1960er-Jahre wurden erstmals talkum- (TV) und glasfaserverstärkte (GFV) Produkte auf Basis PP angeboten.

2.6 Liste der Kunststoffe der Beispiele

Die folgende Liste der Kunststoffe, welche bei den Anwendungsbeispielen zum Einsatz kommen (wie Polyamid, Polyethylen, Polyoxymethylen, Polyphenylsulfid) führt neben den Namen und Kürzeln nach IUPAC auch auf, ob es sich um Thermoplast-, Duroplast- oder Elastomerwerkstoffe handelt. Weiterhin werden grobe Angaben zur chemischen Beständigkeit und zu Eigenschaften und Verwendung gemacht.

Name	Kürzel	Art	Typ	Chemische Beständigkeit	Eigenschaften	Verwendung	Handelsnamen (Auswahl)
Polyamid	PA	Polykondensat	Thermoplast	Alkohol, Kraftstoff, Öl, schwache Laugen, Säure, Salze	Hart, sehr zäh, abriebfest, gleitfähig, schalldämpfend, maßbeständig	bis 100 °C formbeständig, Druckschläuche, Dichtungen, Feinwerktechnik, Lager, Fasern, Zahnräder	Nylon, Perlon, Durethan, (Lanxess), Ultramid (BASF), Zytel (DuPont),
Polyethylen	PE	Polymerisat	Thermoplast	Benzol, Laugen, Lösungsmittel, Säuren, witterungsbeständig	Weich, flexibel (PE-LD) bis steif, unzerbrechlich (PE-HD), durchscheinend, geruchsfrei	bis 80 °C (PE-LD) bzw. bis 100 °C (PE-HD), Dichtungen, Folien, Isoliermaterial, Rohre, Flaschen	Hostalen (Basell), Vestolen, Trolen
Polyoxymethylen oder Polyacetal	POM	Polymerisat	Thermoplast	Fast alle Lösungsmittel	Hart, zäh, gleitfähig, teilkristallin, geringe Wasseraufnahme, maßbeständig	von -50 °C bis 120 °C, Armaturen, Beschläge, Lager, Zahnräder	Delrin (DuPont), Hostaform (Ticona), Ultraform (BASF)
Polyphenylsulfid	PPS	Polykondensat	Thermoplast				Fortron (Ticona), Ryton (Phillips), Tedur (Albis)

Tab. 1: Kunststoffübersicht (Quelle: Wikipedia 2008)

2.7 Unverstärkte Kunststoffe

Zeichen	Werkstoff	Dichte σ [g cm ⁻³]	Streckspannung R_s [N mm ⁻²]	E-Modul (Zugspannung) E [kN mm ⁻²]	Reißdehnung A_R [%]	Längenausdehnung α [10 ⁻⁵ K ⁻¹]
PA 6	Polyamid 6	1,13	80	3,2	200	7...10
PC	Polycarbonat	1,2	60	2,2	80	7
PE	Polyethylen	0,94	22	1,0	450	20
POM	Polyoxy- methylen	1,41	68	3,1	12...20	11
PP	Polypropylen	0,91	37	1,4	20...500	15

Tab. 2: Übersicht unverstärkte Kunststoffe (Quelle: Wikipedia 2008)



Abb. 21: Beispiel für ein Spritzgussteil
(Quelle: Firma Kern GmbH 2008)

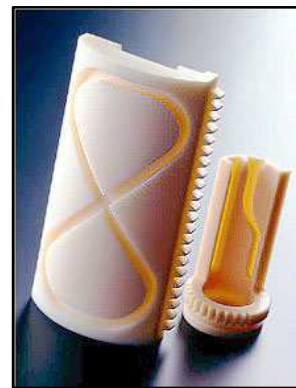


Abb. 22: Beispiel für eine mechanische Fertigung
eines Kunststoffteiles (Quelle: Firma Kern GmbH
2008)

3 Beispiele aus der Praxis

3.1 Beispiel 1: Kunststoff-Propeller zur Unterstützung von Segelbooten bei der Einfahrt in den Hafen (Bugstrahlruder)

3.1.1 Erläuterungen zum Projekt

Den Anstoß zu diesem Beispiel lieferte ein Kollege, der ein begeisterter Segler ist. Bereits vor einigen Jahren wurde in einem Gespräch das Vorhaben einen solchen Propeller zu entwickeln diskutiert.

Die Idee, ein Bugstrahlruder für Segelboote zu entwickeln besteht bereits seit längerem. Allerdings scheiterte die Umsetzung bislang an den verwendeten Materialien und an der Baugröße. Um ein Bugstrahlruder realisieren zu können, müssen vor allem vom Propeller folgende Anforderungen erfüllt werden:

- Geringes Gewicht
- Kostengünstige Herstellung (z.B. im Spritzgussverfahren)
- Kleine Baugröße möglich
- Maßhaltigkeit
- Süß- und Salzwasserresistent
- Hohe Steifigkeit
- Niedrige Sprödigkeit
- Soll die Sollbruchstelle sein um den Motor und das Getriebe zu schonen

Ein Propeller aus dem Werkstoff Aluminiumbronze erfüllt einige aber nicht alle Punkte. Im Allgemeinen werden Propeller aus Aluminiumbronze gegossen. Ein Guss für eine kleine Baugröße wie für dieses Beispiel gefordert – der Außendurchmesser beträgt 148 mm -, ist allerdings nicht mehr möglich (zu dünne Wandstärken, das Material an den Flügeln kühlt zu schnell ab, somit ist die Gefahr groß, dass es zu Spannungsrissen oder nicht vollständig ausgefüllten Gussformen kommt). Daher müssten solche Propeller aus einem Rundstab gefräst und gedreht werden. Der Punkt kleine Baugröße wäre somit erfüllbar, allerdings wird für die Fertigung fast die doppelte Menge an Vormaterial benötigt als der fertige Propeller hat. Der Punkt Kostengünstigkeit kann deshalb nicht gewährleistet werden.

Da Aluminiumbronze ca. eine Dichte von 7,4 bis 8,2 g/cm³ und PA 6 GF 30 eine Dichte von ca. 1,36 g/cm³ hat, wäre ein Propeller aus Aluminiumbronze etwa achtmal und somit unverhältnismäßig schwerer als ein Kunststoffpropeller.

Wiederum kein Problem wäre der Punkt Maßhaltigkeit, da das Material Aluminiumbronze im Wasser nicht quillt und die Schwankungen der Wassertemperaturen zu gering für eine

kritische Maßänderung sind. Das Material ist zudem auch salzwasserresistent. Aluminiumbronze hat ein E-Modul von ca. 110.000 N/mm² (PA 6 GF 30 nur ca. 9.000 N/mm²) und eine Zugfestigkeit von ca. 550 N/mm² (PA 6 GF 30 nur ca. 175 N/mm²). Aluminiumbronze ist somit hoch belastbar und nicht spröde. Durch die hohe Festigkeit wäre der Propeller-Flügel keine Sollbruchstelle und würde somit beim Blockieren eine Zerstörung des Getriebes oder Motors hervorrufen.

Für Stähle aller Art gelten die gleichen Argumente wie für Aluminiumbronze. Wobei beim Edelstahl 1.4301 extra betont werden sollte, dass dieser nicht salzwasserresistent ist. Aufgrund der hohen rotierenden Massen muss das Getriebe, die Achsen, die Lager und der Motor des Segelbootes dementsprechend groß dimensioniert werden. Solche Antriebe sind demnach schwer und strömungstechnisch nicht geeignet für Segelboote, da sie durch deren Größe das Gleit- und Lenkverhalten des Bootes negativ beeinflussen würden.

Hinsichtlich des Einsatzes von Kunststoff für einen solchen Propeller, bedurfte es einiger Anläufe, bis das richtige Kunststoffmaterial gefunden werden konnte. Als geeignetes Material für diesen Einsatz erwies sich schließlich PA 6 GF 30 (Polyamid 6 mit 30 % Glasfaser). Dieses Polymer ist formstabil, besitzt eine ausreichende Festigkeit (nähere Daten vgl. Tab. 3) damit der Propeller-Flügel sich beim Rotieren nicht verformt, aber trotzdem eine Sollbruchstelle darbietet. PA 6 GF 30 lässt sich gut als Spritzgussteil verarbeiten. Als Glasfasern werden sogenannte kurze Fasern verwendet (max. 0,22 mm lang). Diese Fasern können beim Spritzgießen leicht richtungsorientiert eingebracht werden. Bei diesem Propeller werden die Fasern radial eingebracht, um eine hohe Zugfestigkeit gepaart mit hoher Elastizität in Achsrichtung zu erreichen.

Im vorliegenden Projekt wurden die ersten Prototypen aus dem Vollen gefräst. Die Kosten pro Stück lagen hierfür bei ca. 105,-- €. Bei Anlaufen einer Serie würden die Propeller im Spritzgussverfahren hergestellt werden, wobei die Herstellung des Spritzgusswerkzeuges ca. 10.000,-- € kostet, das Spritzgussteil dann selber nur noch 1,-- €. Durch die guten Materialeigenschaften von PA 6 GF 30 und die relativ geringen Herstellungskosten im Falle eines Spritzgussverfahrens könnte dieses Projekt durchaus die Serienreife erhalten.

3.1.2 Anforderung an das Material PA 6 GF 30

Die wesentlichen Anforderungen sind dieselben wie unter Kap. 3.1.1 beschrieben.

Der Propeller aus PA 6 GF 30 wiegt, bedingt durch die relativ geringe Dichte von ca. 1,36 g/cm³, nur 1/8 als der aus Aluminiumbronze, der ca. 2,4 kg wiegen würde. Die

kostengünstige Herstellung des Kunststoffpropellers im Spritzgussverfahren lässt sich nur durch hohe Stückzahlen (wie im Kap. 1.1 beschrieben) erreichen. Beim Spritzguss kann noch etwas Material und dadurch Gewicht eingespart werden, da die Wandstärken der Flügel um 1-2 mm geringer ausfallen als der Prototyp.

Das Material PA 6 GF 30 hat bei ständigem Wasserkontakt eine Wasseraufnahme von ca. 6,6 %, das heißt es ist nicht maßhaltig. Die Maßhaltigkeit wird durch anschließendes Konditionieren der Spritzgussteile gewährleistet.

Beim Anlaufen des Motors treten an den Flügelenden hohe Widerstände auf (Staudruck), die die Flügel aus dem Material PA 6 GF 30 regelrecht verbiegen. Damit die Propellerflügel in achsialer Richtung eine derart hohe Elastizität aufweisen wird durch die Anordnung der Glasfasern bewirkt. Diese werden in radialer Richtung ausgerichtet. Dabei handelt es sich um Kurzglasfasern mit einer Länge von maximal 0,22 mm. Somit erreicht der Propeller in radialer Richtung die nötige Zugfestigkeit, welche mindestens 90 N/mm² sein soll, und in achsialer Richtung die für diese Beanspruchung nötige Elastizität.

Erst wenn der Widerstand des Wassers abnimmt, d.h. wenn ein Vortrieb entsteht, kehren die Flügel in ihre ursprüngliche Form zurück. Durch dieses Phänomen muss beim Anlaufen des Motors nicht mit einem Frequenzumrichter oder einer elektronisch geregelten „Anfahrtsrampe“ gearbeitet werden, wie dies bei herkömmlichen Propellern erforderlich ist. Durch die lineare Anordnung der Glasfasern (normal auf die Drehachse) wird bewirkt, dass die Propellerflügel sich dementsprechend verbiegen können, aber bei voller Drehzahl nicht abbrechen.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist das Vorsehen einer Sollbruchstelle als Überlastungsschutz. In einem Hafen schwimmen üblicherweise bestimmte Mengen an Treibgut, welche durch den laufenden Propeller angesaugt werden und somit zum Blockieren des Propellers führen können. Dies verursacht möglicherweise ein Überlasten des Motors (Durchbrennen der Motorwicklungen), einen Zahnradbruch des Getriebes oder gar einen Achsbruch. Die Reparatur dieser Teile würde mehrere Tage in Anspruch nehmen und wäre mit verhältnismäßig hohen Kosten verbunden. Die Sollbruchstelle des Kunststoffpropellers befindet sich am Flügel selber – etwa bei 2/3 der Höhe - und nicht direkt am Fuß. Durch diese Schutzfunktion soll ein Steckenbleiben des Propellers bei angesaugtem Treibgut verhindert werden und der Motor und das Getriebe vor Schäden bewahrt bleiben. Der Propeller ist, wie bereits oben erwähnt, das günstigste Element an der gesamten Einheit und leicht auszutauschen.

3.1.3 Materialien allgemein

Propeller als Hauptantrieb können aus unterschiedlichen Materialien gefertigt werden.

Schiffspropeller werden aus speziellen Legierungen hergestellt, entweder aus Bronze oder einer Kupfer-Nickel-Legierung. Bei Booten sind Bronze, Inox-Stahl, Aluminium, sowie Glas- oder Kohlefaser-verstärkte Kunststoffe üblich.

Für Bugstrahlruder wurden bisher überwiegend die Materialien Aluminium und Edelstahl verwendet, wobei Edelstahl nur für Süßwasser geeignet ist (nicht salzwasserbeständig). Die Verarbeitung dieser Materialien ist extrem aufwendig und sie verursacht lange Standzeiten der Bearbeitungsmaschinen, außerdem müsste hier aus dem Vollen gefräst werden. Auch Kupfer, das standardmäßig im großen Schiffsbau eingesetzt wird, eignet sich aufgrund der hohen Drehzahl des Bugstrahlruders nicht.

Die Wahl des Materials bestimmt auch die erreichbare Leistung. Hochfeste Materialien erlauben schlankere und dünnere Flügel und somit oft höhere Wirkungsgrade.

3.1.4 Kenngrößen für PA 6 GF 30

Im vorliegenden Beispiel wird für den Propeller das Material PA 6 GF 30 eingesetzt. Das Material ist sowohl für eine mechanische Bearbeitung als auch für den Spritzguss geeignet. PA 6 GF 30 ist sehr maßhaltig und formstabil.

Verstärkte Polyamide (vgl. Tab. 3) haben im Vergleich zu PA 6 (vgl. Tab. 8) eine hohe Steifigkeit und Festigkeit mit einer extremen Schlagzähigkeit. Das macht sie äußerst robust gegen mechanische Beanspruchung. Weiters sind Polyamide kältefest, stoßbelastbar, abriebfest selbst bei rauhem Gleitpartner und sie besitzen ein hohes Arbeitsvermögen.

Die Werkstoffgruppe Polyamid 6 (PA 6) bietet universelle Werkstoffe für mechanische Funktionsteile im Maschinenbau. Typische Anwendungen sind formstabile und schlagzähe Gehäuseteile, kraftübertragende oder andere hochbelastete Maschinenelemente.

<u>Polyamid 6 mit 30% Glasfaser (PA 6 GF 30)</u>			
Werkstoffnummer		1113	
Dichte	ISO 1183	1,36	g/cm ³
Probekörperzustand		trocken/luftfeucht	
<u>Mechanische Eigenschaften</u>			
Zugfestigkeit	ISO 527	175/110	MPa
Reißdehnung	ISO 527	3/5	%
Zug-E-Modul	ISO 527	9000/6000	MPa
Kugeldruckhärte	ISO 2039-1	220/150	MPa
Norm für Kugeldruckhärte		H961/30	
Härte Shore (A/D) oder Rockwell (R/L/M)	ISO 868, ISO 2039-2	D86/D83	-
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 180/1A	15,5/20,0	KJ/m ²

Charpy-Kerbschlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 179/1eA	15/30	KJ/m ²
<u>Thermische Eigenschaften</u>			
Wärmeleitfähigkeit	DIN 52 612	0,24	W/K m
Längenausdehnung längs quer zur Fließrichtung	ISO 11359	23 65	10 ⁻⁶ /K
Schmelz- bzw. Glasübergangstemperatur	ISO 11357	220	°C
Wärmeformbeständigkeit A	ISO 75 HDT/A (1.8 MPa)	210	°C
Wärmeformbeständigkeit B	ISO 75 HDT/B (0,45 MPa)	220	°C
max. Temperatur kurzzeitig		200	°C
max. Temperatur dauernd		130	°C
min. Anwendungstemperatur		-40	°C
<u>Sonstige Eigenschaften</u>			
Wasseraufnahme bei Normalklima	ISO 62	2,1	%
Wasseraufnahme bei Wasserlagerung	ISO 62	6,6	%
Brennverhalten nach UL 94	IEC 60695-11-10	HB	-
Dicke für UL 94		1,5	mm
Transparenz (opak/transluzent/klarsichtig)		opak	
<u>Spezielle Eigenschaften</u>			
Biegefestigkeit	ISO 178	250/200	MPa
Izod-Schlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 180/1C	70/-	KJ/m ²
Izod-Schlagzähigkeit bei -30 °C	ISO 180/1C	60/-	KJ/m ²
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei -30°C	ISO 180/1A	12,5/-	KJ/m ²
Charpy-Schlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 179/1eU	95/110	KJ/m ²
Charpy-Schlagzähigkeit bei -30 °C	ISO 179/1eU	80/-	KJ/m ²
Charpy-Kerbschlagzähigkeit bei -30 °C	ISO 179/1eA	11/-	KJ/m ²
Spezifische Wärmekapazität	IEC 1006	1,50	J/g K
Vicat-Erweichungstemperatur B	ISO 306 VST/B/50 (50 N)	220	°C
Sauerstoffindex LOI	ISO 4589	21	%
<u>Chemische Beständigkeiten</u>			
mineralische Schmierstoffe			➕beständig
aliphatische Kohlenwasserstoffe			➕beständig
aromatische Kohlenwasserstoffe			➕beständig
Benzin			➕beständig
schwache Mineralsäuren			⊞bedingt beständig
starke Mineralsäuren			➖unbeständig
schwache organische Säuren			⊞bedingt beständig
starke organische Säuren			➖unbeständig
oxidierende Säuren			➖unbeständig
schwache Laugen			⊞bedingt beständig
starke Laugen			➖unbeständig

Trichlorethylen	+beständig
Perchlorethylen	+beständig
Aceton	+beständig
Alkohole	+beständig
heißes Wasser (Hydrolysebeständigkeit)	☒bedingt beständig
UV-Licht und Witterung	☒bedingt beständig

Tab. 3: Materialbeschreibung zu PA 6 GF 30 (Quelle: Firma Kern GmbH 2009)

3.1.5 Funktionsbeschreibung allgemein

Die Propellerflügel sind derart geformt und ausgerichtet, dass sie bei der Rotation der Welle vom umgebenden Medium, wie z.B. Luft oder Wasser, schräg oder asymmetrisch umströmt werden. Dadurch entsteht ein Druckgefälle in oder entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung, das eine Strömung des Mediums erzeugt. Jeder einzelne Flügel erfährt als Folge dynamischen Auftrieb. Die schräg gerichteten dynamischen Auftriebskräfte der einzelnen Flügel überlagern ihre Axialkomponenten zu einer resultierenden Kraft zwischen Medium und Propeller, die als Schub bezeichnet wird und den Propeller mitsamt dem verbundenen Objekt antreibt.

Die Flügelbreite richtet sich nach dem Flügelprofil und der Drehgeschwindigkeit. Entscheidend sind Oberflächenreibung und der Zeitpunkt, zu dem Strömungsablösungen eintreten.

Propellerflügel haben in der Regel ein bestimmtes Profil. Die eine Seite ist gewölbt und zwingt dem umfließenden Medium einen längeren Weg auf als die Gegenseite. Dadurch umfließt das Medium diese Seite mit höherer Geschwindigkeit und erzeugt einen Sog.

Da bei einem rotierenden Flügel die Umlaufgeschwindigkeiten je nach Abstand von der Achse für jeden Punkt anders sind, ändern sich die Profilhöhe und der Anstellwinkel über die Länge des Flügels. Der Anstellwinkel ist im inneren Bereich größer und die Profilform im äußeren schnelleren Bereich flacher.

3.1.6 Ausführung

Die Anzahl der Blätter von Propellern ist variabel, sie kann aus nur einem Flügel bestehen und ist nach oben hin prinzipiell unbegrenzt. Bei Großcontainerschiffen z.B. ist die Anzahl produktionstechnisch zurzeit auf sieben beschränkt. Ausschlaggebend für die Flügelzahl ist die Druckdifferenz des Medienstroms vor und nach dem Propeller. Schiffe (insbesondere Schlepper und Eisbrecher), die wesentlich mehr Schub aufwenden müssen als für ihren eigenen Antrieb in offenem Wasser erforderlich wäre, tragen oft Düsenpropeller.

Extremfälle von Propellern sind die archimedische Schraube und Turbinenräder.

Während Propellerflügel fast immer sternförmig (radial) um eine Welle angeordnet sind, hat sich als patentierte Speziallösung der Voith-Schneider-Propeller eine kleine Marktnische erhalten. Er verleiht Wasserfahrzeugen eine besondere Manövrierfähigkeit, da man seinen Schub in alle Richtungen drehen kann. Es handelt sich um eine rotierende Scheibe im Boden des Schiffes, aus der die Flügel spatenförmig nach unten herausragen. Eine Vorrichtung, die man mit der Taumelscheibe eines Hubschraubers vergleichen kann, verändert kontinuierlich den Anstellwinkel jedes Flügels in Abhängigkeit von seiner momentanen Position.

Man unterscheidet sowohl bei Schiffen, als auch bei Flugzeugen zwischen Festpropellern und Verstellpropellern. Verstellpropeller können die Steigung der Flügel verändern, um bei unterschiedlicher Belastung (Flugzeug im Steigflug, Schiff zieht Last) die energiesparendste Steigung neu einzuregulieren. Flugzeuge wie beispielsweise die ATR 42 können damit am Boden auch rückwärts rangieren.

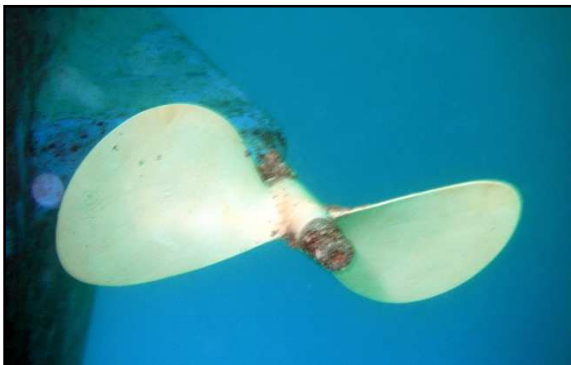


Abb. 23: 2-flügeliger Festpropeller
(Quelle: Wikipedia 2008)



Abb. 24: Verstellpropeller
(Quelle: Wikipedia 2008)

Eine Besonderheit stellen Faltpropeller dar, die bei Segelyachten und Segelflugzeugen mit Hilfsantrieb eingesetzt werden. Bei Motorbetrieb entfalten sie sich durch die Zentrifugalkraft und wirken wie ein normaler Propeller. Bei Segelbetrieb falten sie sich zusammen und reduzieren den Widerstand.

Insbesondere im Passagierschiffbau setzen sich zunehmend elektrische Pod-Antriebe durch.

3.1.7 Funktionsbeschreibung Bugstrahlruder

Das Bugstrahlruder wird zur Verringerung des Wendekreises eingesetzt, es wird starr am Bug des Schiffes montiert. Die Wirkung des Strahls kann nur nach links oder rechts erfolgen. Die Funktion des Propellers bzw. Außenbordmotors - Vortrieb im Hafen - bleibt unverändert. In einem Hafen gestalten sich Wendemanöver mit einem Segelboot meist sehr schwierig, da Segelschiffe bei Fahrt mit Außenbordmotor einen sehr großen Wendekreis haben. Auf offener See kann der Wind zur Verringerung des Wendekreises genutzt werden, was bei einem Anlegemanöver nicht möglich ist.

Durch den Einsatz des Materials PA 6 GF 30 für das Bugstrahlruder ist es möglich, die gesamte Konstruktion um ein Vielfaches zu verkleinern. Zum einen kann die Leistung des Motors um ca. 20 % gesenkt werden, wobei der gleiche Vortrieb wie bei herkömmlichen Konstruktionen erreicht wird. Auch die Achsen können im Durchmesser fast halbiert werden, ebenso können die Lager in der Baugröße um die Hälfte reduziert werden. Das bedeutet für den gesamten Aufbau eine Gewichtsersparnis um nahezu 40 % und eine Verkleinerung um ca. 20 %.

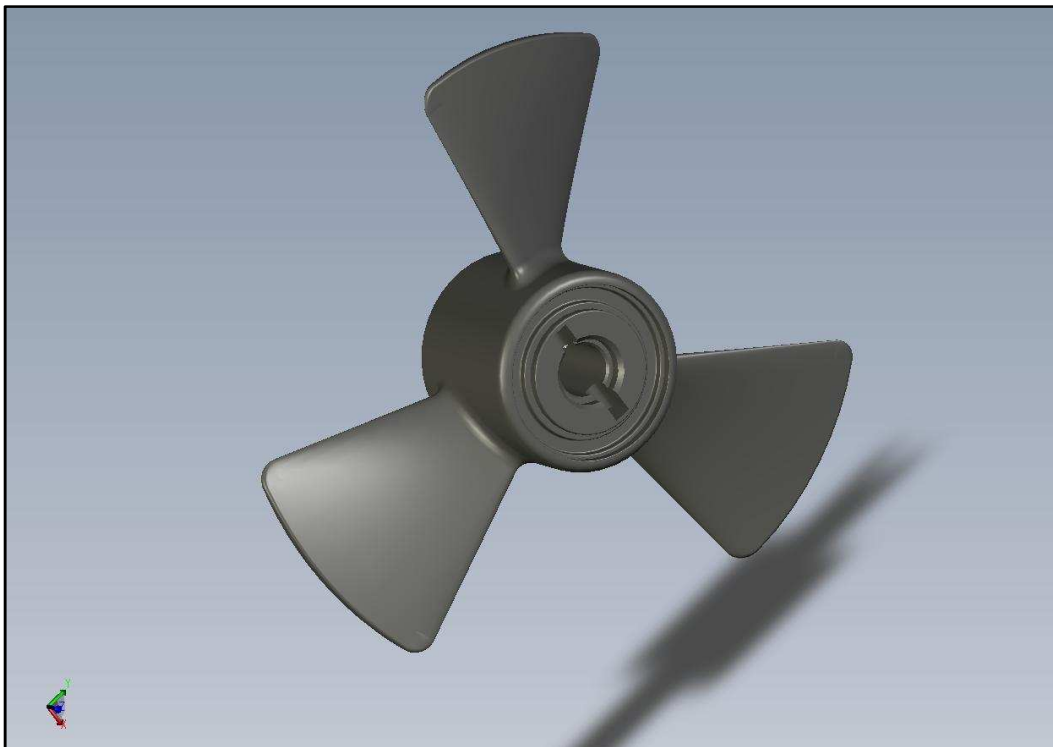


Abb. 25: 3-D Ansicht des Propellers (Vorderansicht)
(Quelle: Firma Hager Kunststoffe GmbH)

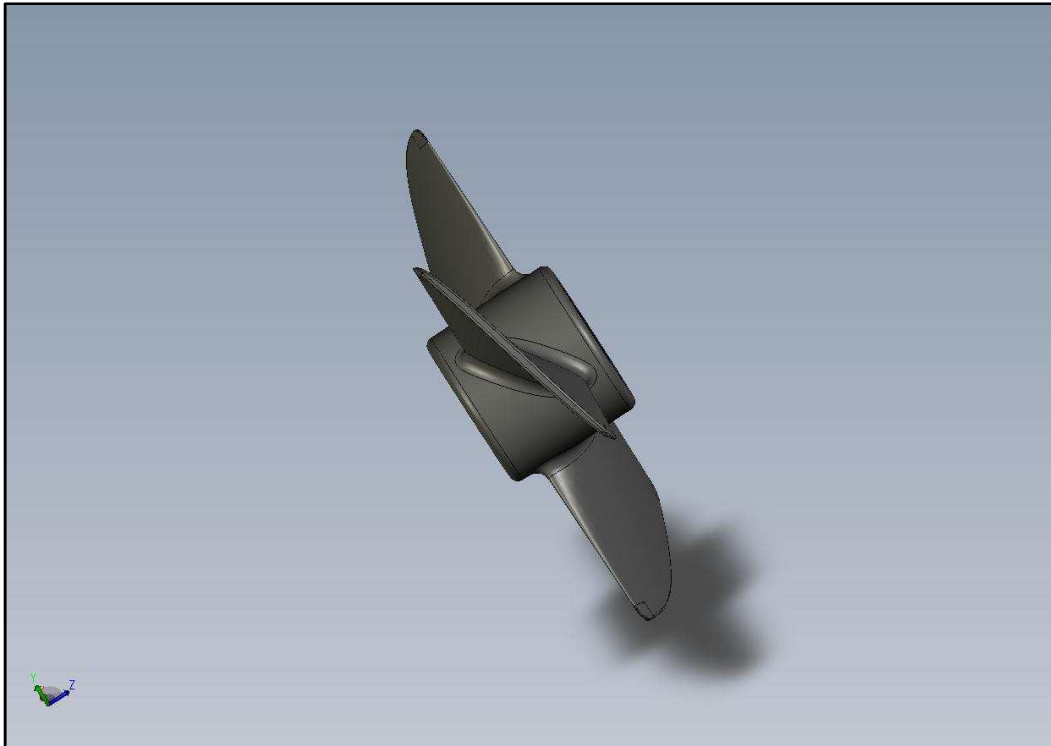


Abb. 26: 3-D Ansicht des Propellers (Seitenansicht)
(Quelle: Firma Hager Kunststoffe GmbH)

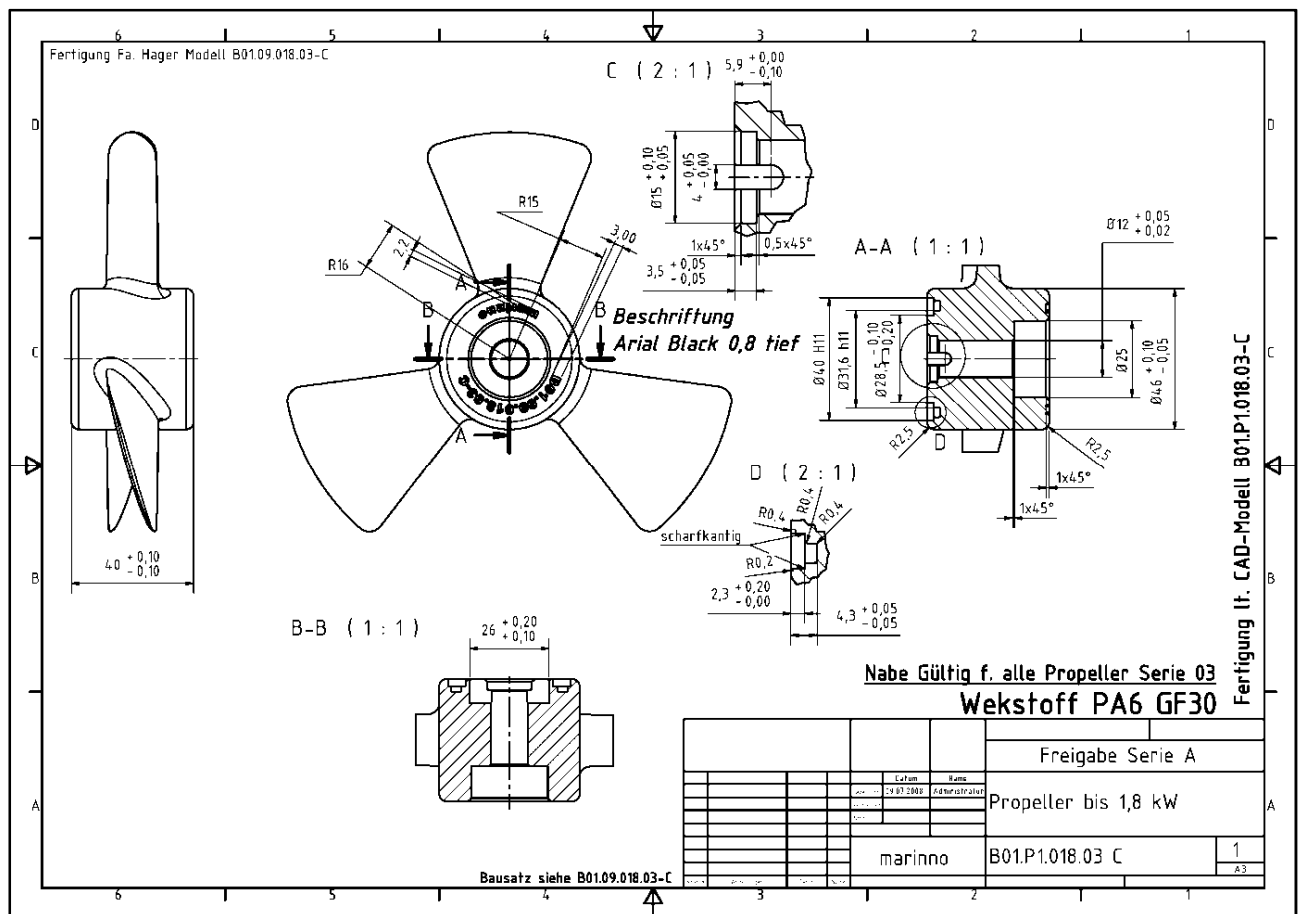


Abb. 27: Konstruktionszeichnung des Propellers (für 1,8 kW)
(Quelle: Firma Hager Kunststoffe GmbH)

3.2 Beispiel 2: Wassertank für Feuerwehrfahrzeuge aus Kunststoff

3.2.1 Erläuterungen zum Projekt

Bei einem Feuerwehreinsatz ist mir aufgefallen, dass die gleichen Tankfahrzeuge eine unterschiedliche Bodenfreiheit aufwiesen, also unterschiedlich schwerbeladen sein mussten, obwohl die Tanks bereits leer waren. Der Grund für diesen Unterschied war, dass der „leichtere“ Wagen mit einem Kunststofftank bestückt wurde. Da es auf den ersten Blick kurios erscheint, dass Kunststoffmaterialien bei Feuerwehreinsätzen Verwendung finden, obwohl Kunststoffe im Allgemeinen als nicht hitzebeständig und leicht entflammbar gelten, war das Interesse für ein weiteres Recherchieren über dieses Einsatzbeispiel geweckt.

3.2.2 Funktionsbeschreibung

Der in diesem Beispiel beschriebene Wassertank wird auf Klein-Lkw aufgebaut. Klein-Lkw sind bei einem Brandfall meist die ersten Fahrzeuge vor Ort. Sie können allerdings nur sehr begrenzt für Löscharbeiten eingesetzt werden, da der Tankinhalt maximal 4.000 Liter beträgt. Daher kommen diese Fahrzeuge vorwiegend bei Katastrophen zum Einsatz, da sie leichter, wendiger und geländegängiger sind als die großen Löschfahrzeuge. Der Einsatz beschränkt sich hierbei weitgehend auf die Trinkwasserversorgung der betroffenen Personen in einem Katastrophengebiet.

3.2.3 Bisher verwendete Materialien

Bisher wurden für derartige Wassertanks Stahl S235JRG oder Niro 1.4301 verwendet. Niro 1.4301 musste eingesetzt werden, um den Lebensmittelbestimmungen gerecht zu werden. Stahl (hauptsächlich S235JRG) wird heute noch für reine Löschfahrzeuge verwendet, meist sind diese innen beschichtet, um auch begrenzt für Trinkwasserversorgung geeignet zu sein. Diese werden zur Sicherung bei angemeldeten Feuern (z.B. Osterfeuer) herangezogen oder für kleinere Brände. Der große Nachteil sowohl von Stahl- als auch von Niro tanks ist ihr hohes Gewicht, wodurch das gesamte Verhalten des Fahrzeugs negativ beeinflusst wird. Auch müssen im Innenraum des Tanks viele Versteifungen eingeschweißt werden, um eine irreversible Verformung der gesamten Konstruktion zu verhindern und in weiterer Folge einem Bersten der Schweißnähte entgegenzuwirken.

Ein weiterer Nachteil ist, dass bereits bei der Konstruktion der Tanks genau festgelegt werden muss, wo und welche Anschlüsse benötigt werden, da eine nachträgliche Änderung sehr aufwendig, wenn nicht sogar unmöglich ist. Bei nachträglichen Änderungen im Falle

eines Nirotanks ist es beispielsweise notwendig, dass der gesamte Tank mit Formiergas gefüllt wird, um ein Rosten der innenliegenden Schweißnähte zu verhindern. Die außenliegenden Schweißnähte können gebeizt oder mechanisch bearbeitet werden, um die Korrosionsbeständigkeit des Niro wieder herzustellen. Bei Stahl müssen die Schweißnähte nicht derart aufwendig bearbeitet werden. In beiden Fällen ist es jedoch erforderlich, dass die Schweißnähte auf Risse (PT-Prüfung) und Ultraschall geprüft werden.

Diese Tanks, seien diese nun aus Stahl oder Niro, müssen bei längerem Stillstand immer voll gefüllt bleiben, da ansonsten rasch Korrosion auftritt. Dies hätte eine aufwendige und teure Reinigung, schlimmstenfalls eine Verschrottung der Tanks zur Folge.

3.2.4 Materialbeschreibung

Folgende Anforderungen muss der eingesetzte Kunststoff aufweisen:

- Formstabil bei Temperaturschwankungen
- Temperaturbeständig von -20 bis +80°C
- Lichtundurchlässig
- Lebensmittelzulassung
- Lange Lebensdauer (langsame Alterung)
- Korrosionsbeständig
- Bedingt UV-Beständig
- Gewichtseinsparung gegenüber Stahl

Für diesen Anwendungsfall wurde Polyethylen mit hoher Dichte (PE-HD) ausgewählt. PE-HD hat zwar eine hohe Längsausdehnung längs oder quer zur Fließrichtung von $120 \cdot 10^{-6}/K$, dem gegenüber hat Stahl eine weitaus geringere Längsausdehnung von $12 \cdot 10^{-6}/K$. Das beeinflusst die Formstabilität keinesfalls, da auch die Schweißnähte die gleiche Längsausdehnung aufweisen. Im Gegensatz zu Stahl, wo beim Schweißen durch Einfluss von hohen Temperaturen eine Gefügeänderung eintritt und dadurch unterschiedliche Längsausdehnungen stattfinden.

Der Kunststoff PE-HD ist für den Temperaturbereich -20 bis +80°C (vgl. Tab. 4) geeignet, dasselbe gilt auch für Stahl.

Das Grundmaterial PE-HD ist weiß und damit bedingt lichtdurchlässig und könnte somit zur Algenbildung im Tank beitragen. Durch Beimengung von Füllstoffen, wie z.B. Ruß, wird der Kunststoff schwarz verfärbt und somit lichtundurchlässig. Die Eigenschaften werden nicht verändert. Die genaue Bezeichnung lautet nun PE-HD schwarz.

Die Lebensmittelzulassung wird trotz der Füllstoffbeimengung beibehalten.

Ein Wassertank aus Stahl bzw. Niro sollte nach 15 bis 20 Jahren ausgetauscht werden, für den Kunststoff gilt lebenslange Garantie. Es gibt so gut wie keine Alterung des Kunststoffes, da das Material auch bedingt UV-beständig ist.

Durch die Anwendung von PE-HD schwarz sind diese Bauteile in ihrer Variabilität (z.B. Formgebung) im Vergleich zu Stahl besonders vielfältig. Der konstruktive Aufbau des Innenbaus gleicht dem der Stahltanks. Durch das geringere E-Modul von 1.350 N/mm² (Stahl S235JRG hat ein E-Modul von ca. 260 kN/mm²) können nicht die gleichen Wandstärken wie bei Stahltanks genommen werden. Diese müssen dementsprechend dicker ausgeführt werden. Es müssen ebenso Versteifungen eingeschweißt werden. Die Anzahl der Versteifungen kann allerdings fast bis auf die Hälfte reduziert werden. Daher ist der Tank mit dem gleichen Fassungsvermögen nur um ca. 30 % leichter als aus Stahl. D.h. diese Fahrzeuge sind insgesamt leichter und daher schneller, wendiger und geländegängiger.

Ein weiterer großer Vorteil ist, dass Anschlüsse auch im Nachhinein leicht versetzt oder neue hinzugefügt werden können. Die Schweißnähte müssen ebenso einigen Prüfungen (z.B. Dichtheitsprüfung, sichtbare Schweißnahtfehler etc.) unterzogen werden. Hinzu kommt, dass sich das Schweißen dieses Kunststoffes um einiges leichter gestaltet, als bei Stahl oder Niro. Für diesen Prozess werden weder Schutzgas, noch ein spezieller Schweißdraht oder hohe Spannungen benötigt, sondern nur Heißluft (ca. 210-240°C) um die Teile miteinander zu verbinden.

Ein weiterer Vorteil solcher Tanks ist die relativ einfache Reinigung durch Ausspülen. Auch müssen diese nicht immer voll gefüllt sein, weil das Material nicht korrosionsanfällig ist. Für ein stabiles Fahrverhalten ist ein voller Tank allerdings erforderlich.

<u>Polyethylen hoher Dichte (PE-HD)</u>			
Werkstoffnummer		1411	
Dichte	ISO 1183	0,963	g/cm ³
<u>Mechanische Eigenschaften</u>			
Streckspannung	ISO 527	30	MPa
Reißdehnung	ISO 527	>400	%
Zug-E-Modul	ISO 527	1350	MPa
Kugeldruckhärte	ISO 2039-1	57	MPa
Norm für Kugeldruckhärte		H132/30	
Härte Shore (A/D) oder Rockwell (R/L/M)	ISO 868, ISO 2039-2	D64	-
<u>Elektrische Eigenschaften</u>			
Dielektrizitätszahl bei 50 Hz	IEC 60250	2,4	-
Dielektrizitätszahl bei 1 MHz	IEC 60250	2,4	-

Dielektrischer Verlustfaktor bei 50 Hz	IEC 60250	2	1E-4
Dielektrischer Verlustfaktor bei 1 MHz	IEC 60250	2	1E-4
Durchschlagfestigkeit	IEC 60243-1	53	kV/mm
Dicke für Durchschlagfestigkeit		1,0	mm
Spezifischer Durchgangswiderstand	IEC 60093	$>10^{14}$	Ohm · m
Oberflächenwiderstand	IEC 60093	$>10^{14}$	Ohm
Kriechstromfestigkeit CTI	IEC 60112	600	-

Thermische Eigenschaften

Wärmeleitfähigkeit	DIN 52 612	0,42	W/K m
Längenausdehnung längs quer zur Fließrichtung	ISO 11359	120-150	$10^{-6}/K$
Schmelz- bzw. Glasübergangstemperatur	ISO 11357	135	°C
Wärmeformbeständigkeit A	ISO 75 HDT/A (1.8 MPa)	49	°C
Wärmeformbeständigkeit B	ISO 75 HDT/B (0,45 MPa)	86	°C
max. Temperatur kurzzeitig		100	°C
max. Temperatur dauernd		90 ⁴⁾	°C
min. Anwendungstemperatur		-80	°C

Sonstige Eigenschaften

Wasseraufnahme bei Normalklima	ISO 62	<0,1	%
Wasseraufnahme bei Wasserlagerung	ISO 62	<0,1	%
Transparenz (opak/transluzent/klarsichtig)		tl	
Rohstoff		Hostalen GC 7260 (Basell)	

⁴⁾ : Wärmealterung, Abfallen der Zugfestigkeit um 50 % nach 20 000 h

Spezielle Eigenschaften

Streckdehnung	ISO 527	10	%
Zug-Kriechmodul (0,5% 1000h)	ISO 899-1	400	MPa
Biegeweichfestigkeit (1E7 Lastwechsel)	ASTM D671	5	MPa
Izod-Schlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 180/1C	NB	KJ/m ²
Izod-Schlagzähigkeit bei -30 °C	ISO 180/1C	NB	KJ/m ²
Gleitkoeffizient gegen Stahl im Trockenlauf		0,20-0,40	-
Spezifische Wärmekapazität	IEC 1006	1,90	J/g K
Vicat-Erweichungstemperatur A	ISO 306 VST/A/50 (10 N)	128	°C
Vicat-Erweichungstemperatur B	ISO 306 VST/B/50 (50 N)	72	°C
Sauerstoffindex LOI	ISO 4589	17	%

NB: Probekörper nicht gebrochen

Chemische Beständigkeiten

mineralische Schmierstoffe	☒beständig
aliphatische Kohlenwasserstoffe	☒beständig
aromatische Kohlenwasserstoffe	☒bedingt beständig
Benzin	☒beständig

schwache Mineralsäuren	➕beständig
starke Mineralsäuren	➕beständig
schwache organische Säuren	➕beständig
starke organische Säuren	➕beständig
oxidierende Säuren	⊖bedingt beständig
schwache Laugen	➕beständig
starke Laugen	➕beständig
Trichlorethylen	⊖bedingt beständig
Perchlorethylen	➕beständig
Aceton	⚠beständig
Alkohole	⚠beständig
heißes Wasser (Hydrolysebeständigkeit)	➕beständig
UV-Licht und Witterung	⊖bedingt beständig

Tab. 4: Materialbeschreibung zu Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) (Quelle: Firma Kern GmbH 2009)

Allgemeine Kennwerte von S235JRG

Rohdichte	7850 kg/m ³
E-Modul	206 kN/mm ²
Wärmeleitfähigkeit	40 - 60 W/mK
Spez. Wärmekapazität	0,46 - 0,48 kJ/kgK
Wärmespeicherzahl	3611 kJ/m ³ K
Wärmeausdehnungskoeffizient	12·10 ⁻⁶ /K
Dampfdiffusionswiderstandszahl	0
Brennbarkeitsklasse	A1

Tab. 5: Allgemeine Kennwerte S235JRG (Quelle: eigene Angaben)

Stoffrelevante Kennwerte von S235JRG

Streckgrenze (Dehngrenze)	185 - 355 N/mm ²
Zugfestigkeit	310 - 630 N/mm ²
Bruchdehnung	18 - 26 %
Schubmodul	85.000 N/mm ²
Querdehnzahl	0,28

Tab. 6: Stoffrelevante Kennwerte S235JRG (Quelle: eigene Angaben)

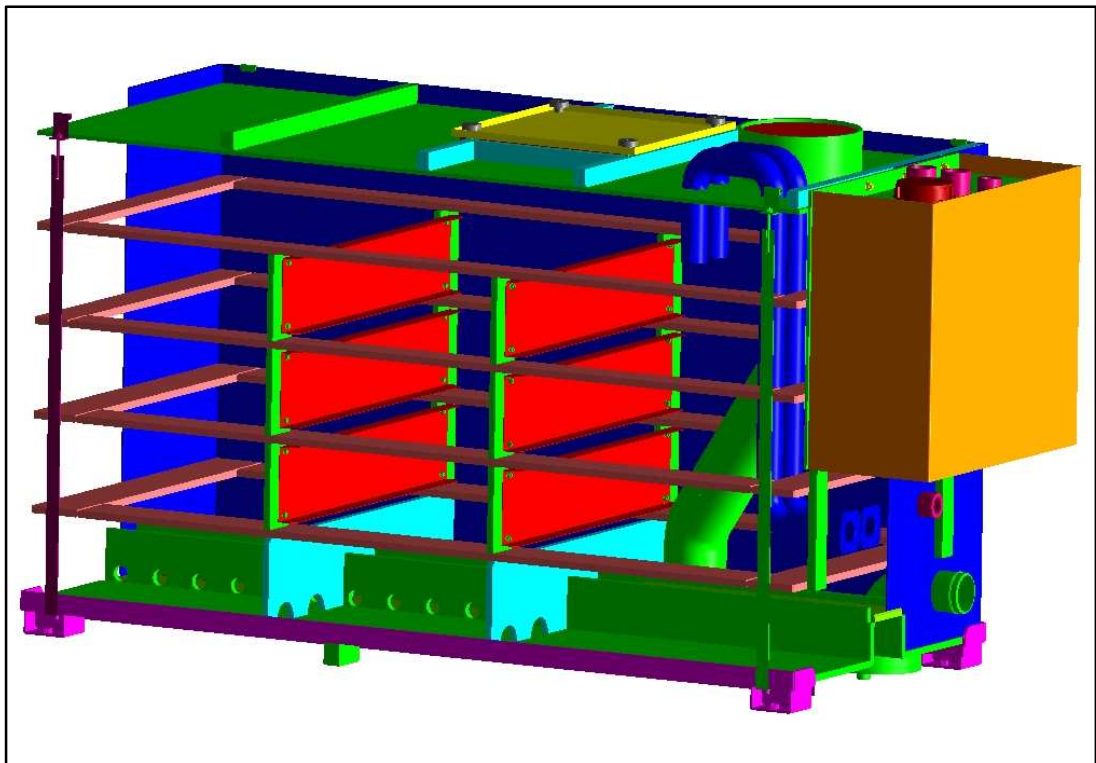


Abb. 29: Schnittdarstellung eines Kunststoffwassertanks (Quelle: Firma Hager Kunststoffe GmbH)

3.3 Beispiel 3: Zahnräder aus Kunststoff

3.3.1 Erläuterungen zum Projekt

Zahnräder aus Kunststoff ist ein bekanntes Thema im Maschinenbau. Solche Zahnräder werden auch im Spezialkranbau eingesetzt. Die Firma Künz GmbH verwendet solche bei Elektrolysekrane. In der Produktionsstätte herrscht eine sehr aggressive Umgebungsluft (bis zu 80 % Schwefelsäurehaltig) vor. Aus diesem Grunde wurde das Thema von mir sofort gewählt.



Abb. 31: Elektrolysekran (Quelle: Firma Hans Künz GmbH)

3.3.2 Bisher verwendete Materialien

Standardmäßig werden in Getrieben legierte Stähle wie z.B. 42CrMo4, 34CrNiMo6, CK40 und CK60 eingesetzt. Die Materialwahl richtet sich nach Drehmoment, Drehzahl und vorgesehenen Betriebsstunden, wobei meist Zahnräder aus verschiedenen Materialien ineinander greifen. Ein Beispiel dafür sind alte Fahrwerksantriebe von Containerkränen (solche sind bereits seit über 30 Jahren im Einsatz). Um den Verschleiß der Komponenten zu verringern wurden für die ineinandergreifenden Zahnräder einerseits CK60 und andererseits 42CrMo4 verwendet. Allerdings ist der Verschleiß bei CK60 um einiges höher, aber es ist günstiger ein Zahnrad alle 50.000 Betriebsstunden zu tauschen, als zwei Zahnräder.

Bei Kranfahrwerksgetrieben wirken enorme Kräfte auf die Zahnflanken ein, da die Kräne (Gewicht bis zu 700 to) abrupt stoppen und anfahren. Beim Aufeinandertreffen von zwei gleichen Materialien mit den gleichen Eigenschaften kommt es des Öfteren vor, dass die Zähne beider Zahnräder abbrechen. Wenn aber ein „weicheres“ Metall auf ein „härteres“

trifft, so kann das „weichere“ Material im Bereich unter der Dehngrenze nachgeben, ohne dass eine permanente Verformung zustande kommt.

3.3.3 Einsatz von Kunststoffen für Zahnräder

Folgende Anforderungen müssen Zahnräder aus Kunststoff erfüllen:

- Geringeres Gewicht gegenüber Stahlzahnradern
- Geringer Verschleiß (hohe Lebensdauer)
- Geräuscharmer Lauf
- Geringe Herstellungskosten
- Gute Notlaufeigenschaften (z.B. ohne zusätzliche Schmierstoffe)
- Wartungsarm
- Kurze Wiederbeschaffungszeiten
- Chemisch resistent gegen Laugen und/oder Säuren
- Maßhaltigkeit
- Temperaturbeständigkeit

Ein geringeres Gewicht der Kunststoffzahnradern gegenüber Stahlzahnradern ist bei gleicher Baugröße leicht zu erbringen, da PA, POM, PE-UHMW ca. um die 8-fache niedrigere Dichte haben als Stahl.

Die einfache Fertigung eines Zahnrades aus Kunststoff ist wohl eines der wichtigsten Vorteile. Zahnräder können als Spritzguss oder spanabhebend aus eigenem Halbzeug gefertigt werden. Gestalt, Stückzahl, Größe, Werkstoff, Verzahnungsqualität und Einsatzbereich bestimmen das Herstellungsverfahren, der Werkstoff wiederum die endgültige Form des Zahnrades. Werkstoffgerechte Form und Fertigung stehen wiederum im direkten Zusammenhang zu Qualität und Lebensdauer des fertigen Zahnrades.

Die Nachbearbeitungen wie Schleifen und Härten entfallen fast vollständig. Bei PA 6 wird des Öfteren das Material im Nachhinein noch konditioniert, um mehr Maßhaltigkeit zu erlangen.

Kunststoffzahnradern sind selbstschmierend. Trotzdem werden Getriebe aus Kunststoff geschmiert, um eine noch längere Lebensdauer und optimalere Kühlung zu gewährleisten. Als Schmierstoffe können Schmieröle auf Mineralölbasis und Fette auf Mineralölbasis verwendet werden. Auch grobverteilte Partikel aus PE-HD, PTFE (Polytetrafluorethylen) oder feinverteilte niedrigmolekulare Schmierstoffe können verwendet werden. Wasser und Ölemulsionen können auch als Schmierstoffe verwendet werden, dienen aber eher der Kühlung.

Solche Zahnräder sind besonders in der chemischen Industrie sehr beliebt, da vor allem Zahnräder aus PA, PE eine hohe Beständigkeit gegen Säuren und Laugen aufweisen. Beispielsweise werden Zahnräder aus PE-UHMW bei Elektrolysekränen der Firma Hans Künz GmbH eingesetzt, da sich diese in einer bis zu 80 %-igen schwefelsäurehaltigen Umgebungsluft am Beständigsten erweisen. Zahnräder aus 1.4301 werden von Schwefelsäure so stark angegriffen, dass diese bereits nach zwei Wochen ausgetauscht werden müssen. Im Gegensatz dazu weist ein Kunststoffzahnrad eine Lebensdauer von mehr als einem Jahr auf.

Die Lagerung der Zahnräder erfolgt trotz dem, dass sie selbstschmierend sind, durch Standard Rillen- oder Kegelrollenlager. Wenn keine Schmierstoffe eingesetzt werden, müssen diese Lager in lebensdauergeschmierter Ausführung gebaut sein. Diese werden eingepresst oder im Spritzguss bereits als Insert mit eingebunden.

Spanabhebend hergestellte Kunststoffzahnräder sind Metallzahnradern selbst dann noch überlegen, wenn es um die Übertragung größter Kräfte geht. Die bei einem hohen Drehmoment auftretenden spezifischen Flächenpressungen bewirken bei Stahlzahnradern eine Werkstoffübertragung von Zahnflanke zu Zahnflanke (Fressen) und eine Verformung über die Streckgrenze (Bartbildung an den Seiten der Zahnflanken). Zahnräder aus Kunststoff dagegen garantieren unter gleichen Einsatzbedingungen eine optimale störungsfreie Kraftübertragung.

Die wichtigsten Vorteile von Zahnrädern aus Kunststoff zusammengefasst:

- Verschleißfest
- Schlagfest
- Die spezifische Flächenpressung
- das besonders hohe Rückstellvermögen (PA und POM)
- Selbstschmierend
- Korrosionsbeständig
- Geräuscharm
- Wartungsfrei
- Optimale Notlaufeigenschaften
- Einfache Bearbeitung

Die Berechnung und Auslegung erfolgt gleich wie bei Stahlzahnradern. Zwei Durchmesser sind für die Bestimmung eines Zahnrades mit geraden Flanken wichtig: der Außen- und der Arbeitsdurchmesser. Der Außendurchmesser bestimmt den Platzbedarf des Zahnrades. Der Arbeitsdurchmesser bestimmt den Abstand der Zahnradachsen. In der Fachliteratur wird der Außendurchmesser als Kopfkreis-Durchmesser und der Arbeitsdurchmesser als

Teilkreis-Durchmesser bezeichnet. Der Teilkreis wird in technischen Zeichnungen mit strichpunktierter Linie dargestellt. Die Teilung p des Zahnrads ist der Abstand von Zahnmitte zu Zahnmitte auf dem Teilkreisdurchmesser. Der Modul m ist das Verhältnis der Teilung p zur Zahl π , $m=p/\pi$.

Der Durchmesser des Teilkreises ergibt sich aus dem Produkt von Modul und Zähnezahl z , $d=m \cdot z$. Rad und Gegenrad müssen immer den gleichen Modul besitzen. Die Kopfhöhe der Zähne ist gleich dem Modul, $h_a=m$. Die Fußhöhe ist gleich dem Modul plus Spiel; üblich sind 25 % vom Modul Spiel, $h_f=1,25 \cdot m$. Der Kopfkreisdurchmesser d_a ist gleich $d_a=m \cdot (z+2)$. Der Fußkreisdurchmesser d_f ist $d_f=m \cdot (z-2,5)$. (Diese Formeln gelten nur für geradverzahnte Zahnräder ohne Profilverschiebung, d.h. unkorrigierte Zahnräder). Der Achsabstand a zweier Geradstirnräder 1 und 2 lässt sich mit den folgenden beiden Formeln berechnen: $a=(d_1+d_2)/2$ od. $a=(z_1+z_2) \cdot (m/2)$. Je nach mechanischer Belastung werden unverstärkte oder mit Glaskugel, Glasfaser und Kohlefaserverstärkte Kunststoffe verarbeitet. Besonders hohe Umgebungstemperaturen fordern Hochleistungskunststoffe wie z.B. PEEK oder elektrisch leitende Kunststoffe gegen statische Aufladung.

3.3.4 Arten von Verzahnungen

Stirnräder

Das Stirnrad oder Zylinderrad ist ein einfaches Rad, das eine zylindrische Kontur hat und an seinem Umfang mit einer Verzahnung versehen ist. Die Achsen eines Stirnrades und seines Gegenrades (auch ein Stirnrad oder eine stirnverzahnte Welle) liegen parallel, es entsteht ein Stirnradgetriebe. Man unterscheidet Außen- und Innenzahnrad.

Das Stirnrad dient der Übertragung von Drehmomenten und der Veränderung von Drehzahlen. Die Verzahnung kann gerade, d.h. achsparallel, schräg (Schrägverzahnung) oder als Bogenverzahnung ausgeführt sein. Die Größe der Verzahnung wird bestimmt als Modul. Das Gegenrad muss eine Verzahnung von gleichem Modul aufweisen. Das Beispielfoto zeigt eine Pfeilverzahnung.

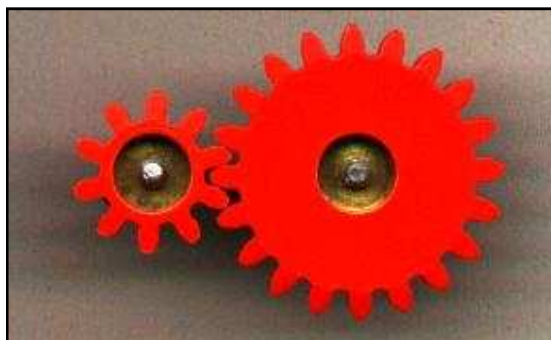


Abb. 32: Stirnräder aus Kunststoff (Quelle: Wikipedia 2008)

Kegelräder

Die Wellen stehen in einem Winkel (meist 90°) zueinander, müssen sich aber schneiden. Die Grundformen sind Kegel, deren Spitzen zusammenfallen. Nach der Zahn längsform unterscheidet man geradverzahnte (Bild) und bogenverzahnte Kegelräder, bei letzteren wiederum solche mit Kreisbogen- und Epizykloidenform. Bogenverzahnte Kegelräder werden oft fälschlicherweise als spiralverzahnte Räder bezeichnet.

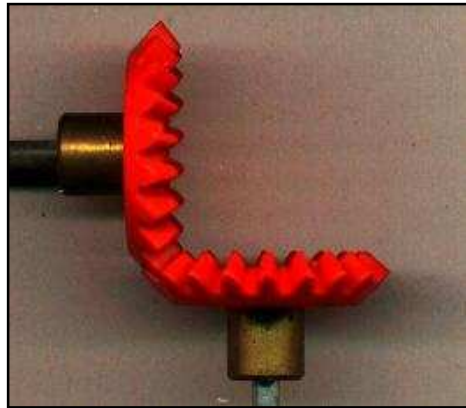


Abb. 33: Kegelrad aus Kunststoff (Quelle: Wikipedia 2008)

Schnecke

Eine besonders häufig angewandte Form ist die Schnecke und das Schneckenrad, die zusammen das Schneckengetriebe bilden. Die beiden Achsen stehen im Winkel von 90° zueinander. Die Schnecke ist quasi ein Zahnrad mit sehr kleiner Zähnezahl/Gangzahl (üblich $z_1=1-8$), wobei die Zähne/Gänge schraubförmig um den Zylinder gewunden sind. Sie sind daher einer Schraube sehr ähnlich, wobei eine Windung einem Zahn entspricht. Das bedeutet, dass eine Umdrehung der Schneckenachse eine Schneckenradteilmumdrehung von $360^\circ z_1$ bewirkt. Daraus resultiert auch das Übersetzungsverhältnis von $i=z_2: z_1$. Unter einem bestimmten Steigungswinkelbereich der Schneckengänge werden Schneckengetriebe selbsthemmend, d.h. der Antrieb für die Übertragung einer Drehbewegung kann nur von der Schnecke auf das Zahnrad erfolgen, aber nicht umgekehrt. Ein Drehmoment, welches vom Zahnrad auf die Schnecke wirkt, wird durch Reibungskräfte blockiert.

Beim Schneckenradgetriebe wird mit wenig Kraft ein hohes Moment erzeugt. Allerdings kann hier nur bedingt, bei niedrigen Momenten, Kunststoff eingesetzt werden, da sonst ein „Durchrutschen“ (durch Verformung der Zahnflanken) auftritt. Die Zahnräder finden Einsatz z.B. bei Drehorgeln in Plüschtieren, zum Teil in Uhren, Servos etc.



Abb. 34: Schneckengetriebe aus Kunststoff (Quelle: Wikipedia 2008)

Zahnstangen

Zahnstangen sind gerade Stangen. Sie ermöglichen eine Umwandlung einer Rotation in eine lineare Bewegung und umgekehrt. Die Bewegungsfreiheit ist jedoch eingeschränkt, da die Stange in der Länge begrenzt ist und somit nur eine abwechselnde Bewegung in die zwei entgegengesetzten Richtungen längs zur Stange zulässt. Eine mögliche Anwendung ist die Zahnradbahn nur aus Stahl. Zahnstangen aus Kunststoff werden z.B. als Antrieb für automatische Tore verwendet.



Abb. 35: Zahnstange aus Kunststoff (Quelle: Wikipedia 2008)

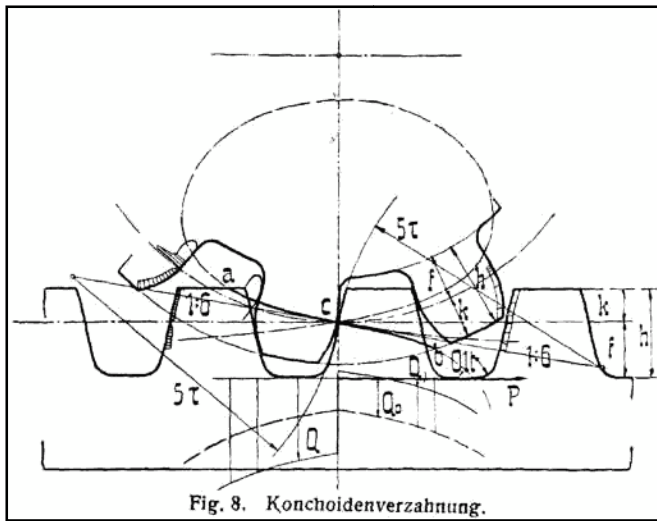


Abb. 36: Konstruktionszeichnung eines Zahnstangenantriebs (Quelle: Firma Kern GmbH 2008)

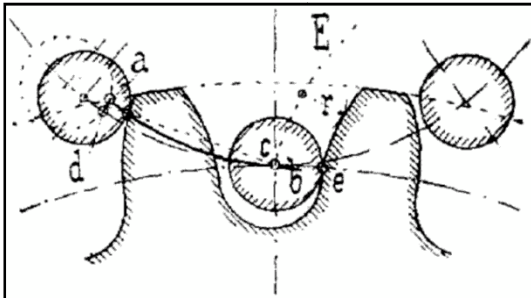


Abb. 37: Konstruktionszeichnung einer Triebstockverzahnung (Quelle: Firma Kern GmbH 2008)

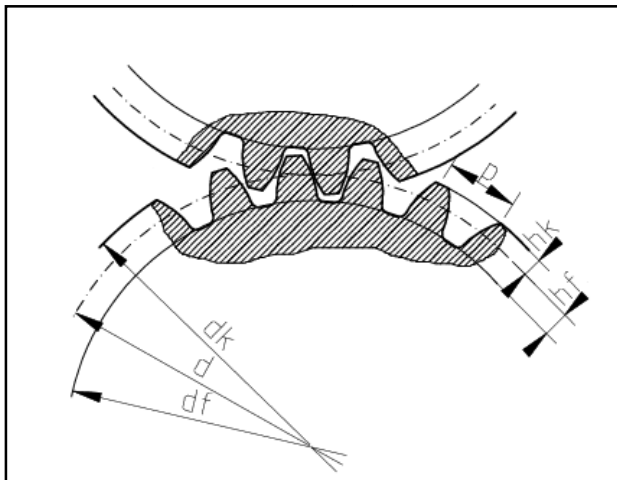


Abb. 38: Konstruktionszeichnung eines Strinrads (Quelle: Firma Hans Künz GmbH)

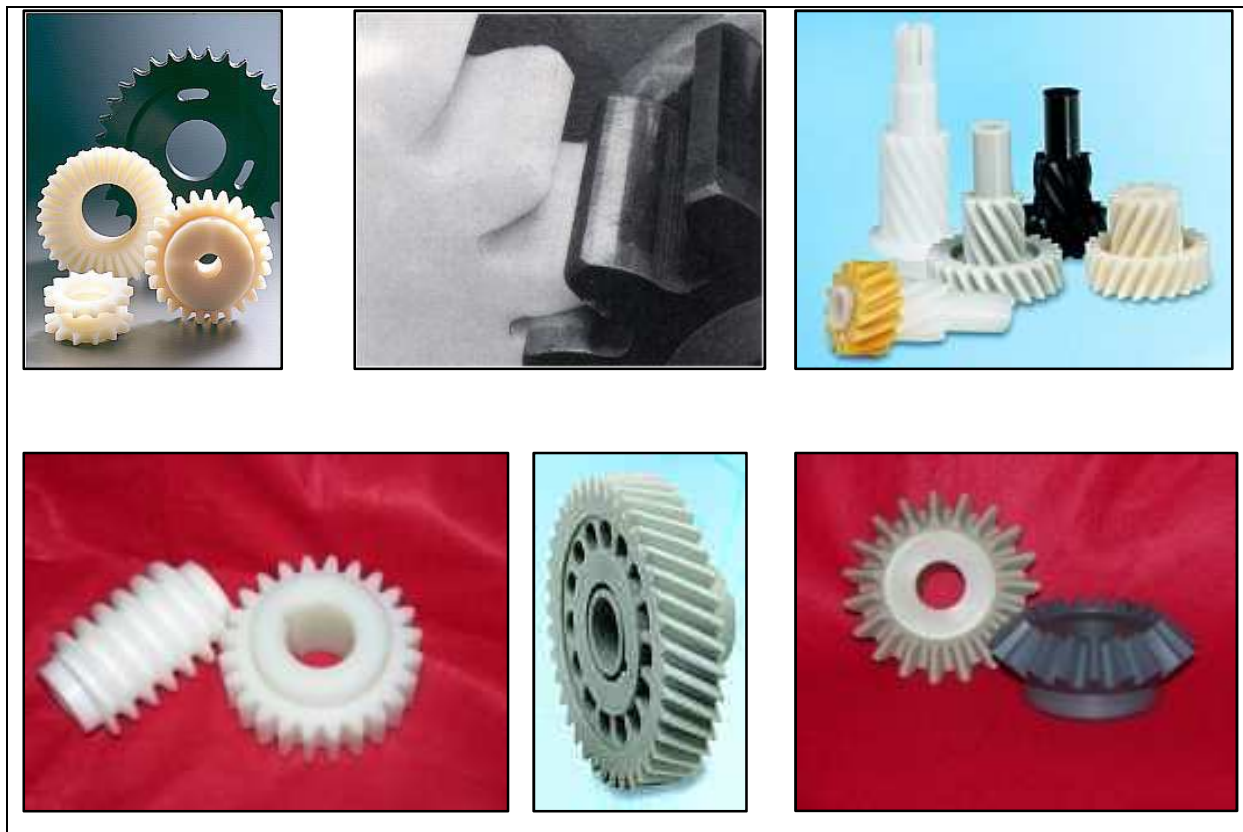


Abb. 39: Beispiele für verschiedene Zahnradtypen (Quelle: Firma Kern GmbH 2008)

Polyethylen ultrahochmolekular (PE-UHMW)

Werkstoffnummer		1401	
Dichte	ISO 1183	0,930	g/cm ³
<u>Mechanische Eigenschaften</u>			
Streckspannung	ISO 527	17	MPa
Reißdehnung	ISO 527	>50	%
Zug-E-Modul	ISO 527	720	MPa
Kugeldruckhärte	ISO 2039-1	38	MPa
Norm für Kugeldruckhärte		H132/30	
Härte Shore (A/D) oder Rockwell (R/L/M)	ISO 868, ISO 2039-2	D63	-
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 180/1A	80	KJ/m ²
<u>Thermische Eigenschaften</u>			
Wärmeleitfähigkeit	DIN 52 612	0,42	W/K m
Längenausdehnung längs quer zur Fließrichtung	ISO 11359	200	10 ⁻⁶ /K
Schmelz- bzw. Glasübergangstemperatur	ISO 11357	132	°C
Wärmeformbeständigkeit A	ISO 75 HDT/A (1,8 MPa)	42	°C
Wärmeformbeständigkeit B	ISO 75 HDT/B (0,45 MPa)	65	°C
max. Temperatur kurzzeitig		120	°C
max. Temperatur dauernd		80	°C

min. Anwendungstemperatur		-200	°C
<u>Sonstige Eigenschaften</u>			
Wasseraufnahme bei Normalklima	ISO 62	<0,1	%
Wasseraufnahme bei Wasserlagerung	ISO 62	<0,1	%
Transparenz (opak/transluzent/klarsichtig)		opak	
Rohstoff		Hostalen GUR 4120 (Ticona)	
na: nicht anwendbar			
<u>Spezielle Eigenschaften</u>			
Streckdehnung	ISO 527	17	%
Zug-Kriechmodul (0,5% 1000h)	ISO 899-1	230	MPa
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei -30°C	ISO 180/1A	100	KJ/m ²
Gleitkoeffizient gegen Stahl im Trockenlauf		0,20-0,30	-
Gleitverschleiß relativ zur Flächenpressung		35	(µm/km)/MPa
Kriechstromfestigkeit CTI M	IEC 60112	600M	-
Spezifische Wärmekapazität	IEC 1006	1,84	J/g K
Vicat-Erweichungstemperatur A	ISO 306 VST/A/50 (10 N)	134	°C
Vicat-Erweichungstemperatur B	ISO 306 VST/B/50 (50 N)	80	°C
Sauerstoffindex LOI	ISO 4589	18	%
<u>Chemische Beständigkeiten</u>			
mineralische Schmierstoffe			+beständig
aliphatische Kohlenwasserstoffe			+beständig
aromatische Kohlenwasserstoffe			▣bedingt beständig
Benzin			+beständig
schwache Mineralsäuren			+beständig
starke Mineralsäuren			+beständig
schwache organische Säuren			+beständig
starke organische Säuren			+beständig
oxidierende Säuren			▣bedingt beständig
schwache Laugen			+beständig
starke Laugen			+beständig
Trichlorethylen			+beständig
Perchlorethylen			▣bedingt beständig
Aceton			▣beständig
Alkohole			+beständig
heißes Wasser (Hydrolysebeständigkeit)			+beständig
UV-Licht und Witterung			▣bedingt beständig

Tab. 7: Materialbeschreibung zu Polyethylen ultrahochmolekular (PE-UHMW)
(Quelle: Firma Kern GmbH 2009)

Polyamid 6 (PA 6)			
Werkstoffnummer		1102	
Dichte	ISO 1183	1,14	g/cm ³
Probekörperzustand		trocken/luftfeucht	
<u>Mechanische Eigenschaften</u>			
Streckspannung	ISO 527	80/45	MPa
Reißdehnung	ISO 527	70/200	%
Zug-E-Modul	ISO 527	3000/1000	MPa
Kugeldruckhärte	ISO 2039-1	150/70	MPa
Norm für Kugeldruckhärte		H358/30	
Härte Shore (A/D) oder Rockwell (R/L/M)	ISO 868, ISO 2039-2	D82/D68	-
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 180/1A	5,5/NB	KJ/m ²
Charpy-Kerbschlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 179/1eA	5/35	KJ/m ²
<u>Elektrische Eigenschaften</u>			
Dielektrizitätszahl bei 50 Hz	IEC 60250	3,4/15	-
Dielektrizitätszahl bei 1 MHz	IEC 60250	3,1/4,7	-
Dielektrischer Verlustfaktor bei 50 Hz	IEC 60250	65/3900	1E-4
Dielektrischer Verlustfaktor bei 1 MHz	IEC 60250	165/1300	1E-4
Durchschlagfestigkeit	IEC 60243-1	15	kV/mm
Dicke für Durchschlagfestigkeit		1,0	mm
Spezifischer Durchgangswiderstand	IEC 60093	10 ¹³ /10 ¹⁰	Ohm · m
Oberflächenwiderstand	IEC 60093	10 ¹³ /10 ¹⁰	Ohm
Kriechstromfestigkeit CTI	IEC 60112	600	-
<u>Thermische Eigenschaften</u>			
Wärmeleitfähigkeit	DIN 52 612	0,23	W/K m
Längenausdehnung längs quer zur Fließrichtung	ISO 11359	70 100	10 ⁻⁶ /K
Schmelz- bzw. Glasübergangstemperatur	ISO 11357	220	°C
Wärmeformbeständigkeit A	ISO 75 HDT/A (1,8 MPa)	65	°C
Wärmeformbeständigkeit B	ISO 75 HDT/B (0,45 MPa)	160	°C
max. Temperatur kurzzeitig		180	°C
max. Temperatur dauernd		90	°C
min. Anwendungstemperatur		-40	°C
<u>Sonstige Eigenschaften</u>			
Wasseraufnahme bei Normalklima	ISO 62	3,0	%
Wasseraufnahme bei Wasserlagerung	ISO 62	9,5	%
Brennverhalten nach UL 94	IEC 60695-11-10	HB	-
Dicke für UL 94		1,5	mm
Transparenz (opak/transluzent/klarsichtig)		opak	
NB: Probekörper nicht gebrochen			

<u>Spezielle Eigenschaften</u>			
Streckdehnung	ISO 527	4,5/20	%
Zug-Kriechmodul (0,5% 1000h)	ISO 899-1	-/700	MPa
Biegefestigkeit	ISO 178	125/60 ¹⁶⁾	MPa
Biegewechselfestigkeit (1E7 Lastwechsel)	ASTM D671	33	MPa
Izod-Schlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 180/1C	NB/NB	KJ/m ²
Izod-Schlagzähigkeit bei -30 °C	ISO 180/1C	NB/NB	KJ/m ²
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei -30°C	ISO 180/1A	5,0/-	KJ/m ²
Charpy-Schlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 179/1eU	NB/NB	KJ/m ²
Charpy-Schlagzähigkeit bei -30 °C	ISO 179/1eU	100/80	KJ/m ²
Charpy-Kerbschlagzähigkeit bei -30 °C	ISO 179/1eA	5,0/5,0	KJ/m ²
Gleitkoeffizient gegen Stahl im Trockenlauf		0,38-0,45	-
Gleitverschleiß relativ zur Flächenpressung		9,5	(µm/km)/MPa
Kriechstromfestigkeit CTI M	IEC 60112	600M	-
Spezifische Wärmekapazität	IEC 1006	1,70	J/g K
Vicat-Erweichungstemperatur B	ISO 306 VST/B/50 (50 N)	204	°C
Sauerstoffindex LOI	ISO 4589	25	%
¹⁶⁾ : Grenzbiegespannung NB: Probekörper nicht gebrochen			
<u>Chemische Beständigkeiten</u>			
mineralische Schmierstoffe			➕beständig
aliphatische Kohlenwasserstoffe			➕beständig
aromatische Kohlenwasserstoffe			➕beständig
Benzin			➕beständig
schwache Mineralsäuren			⊞bedingt beständig
starke Mineralsäuren			➖unbeständig
schwache organische Säuren			⊞bedingt beständig
starke organische Säuren			➖unbeständig
oxidierende Säuren			➖unbeständig
schwache Laugen			➕beständig
starke Laugen			⊞bedingt beständig
Trichlorethylen			➕beständig
Perchlorethylen			➕beständig
Aceton			➕beständig
Alkohole			➕beständig
heißes Wasser (Hydrolysebeständigkeit)			⊞bedingt beständig
UV-Licht und Witterung			⊞bedingt beständig

Tab. 8: Materialbeschreibung zu Polyamid 6 (PA 6) (Quelle: Firma Kern GmbH 2009)

<u>Polyoxymethylen Copolymer (POM-C)</u>			
Werkstoffnummer		1202	
Dichte	ISO 1183	1,39	g/cm ³
<u>Mechanische Eigenschaften</u>			
Streckspannung	ISO 527	65	MPa
Reißdehnung	ISO 527	27	%
Zug-E-Modul	ISO 527	2700	MPa
Kugeldruckhärte	ISO 2039-1	145	MPa
Norm für Kugeldruckhärte		H358/30	
Härte Shore (A/D) oder Rockwell (R/L/M)	ISO 868, ISO 2039-2	D81	-
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 180/1A	5,5	KJ/m ²
Charpy-Kerbschlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 179/1eA	6,0	KJ/m ²
<u>Elektrische Eigenschaften</u>			
Dielektrizitätszahl bei 50 Hz	IEC 60250	3,8	-
Dielektrizitätszahl bei 1 MHz	IEC 60250	3,8	-
Dielektrischer Verlustfaktor bei 50 Hz	IEC 60250	10	1E-4
Dielektrischer Verlustfaktor bei 1 MHz	IEC 60250	50	1E-4
Durchschlagfestigkeit	IEC 60243-1	40	kV/mm
Dicke für Durchschlagfestigkeit		1,0	mm
Spezifischer Durchgangswiderstand	IEC 60093	10 ¹⁴	Ohm · m
Oberflächenwiderstand	IEC 60093	10 ¹⁴	Ohm
Kriechstromfestigkeit CTI	IEC 60112	600	-
<u>Thermische Eigenschaften</u>			
Wärmeleitfähigkeit	DIN 52 612	0,31	W/K m
Längenausdehnung längs quer zur Fließrichtung	ISO 11359	110	10 ⁻⁶ /K
Schmelz- bzw. Glasübergangstemperatur	ISO 11357	167	°C
Wärmeformbeständigkeit A	ISO 75 HDT/A (1.8 MPa)	105	°C
max. Temperatur kurzzeitig		140	°C
max. Temperatur dauernd		100	°C
min. Anwendungstemperatur		-50	°C
<u>Sonstige Eigenschaften</u>			
Wasseraufnahme bei Normalklima	ISO 62	0,20	%
Wasseraufnahme bei Wasserlagerung	ISO 62	0,8	%
Brennverhalten nach UL 94	IEC 60695-11-10	HB	-
Dicke für UL 94		1,5	mm
Transparenz (opak/transluzent/klarsichtig)		opak	
<u>Spezielle Eigenschaften</u>			
Streckdehnung	ISO 527	9,4	%

Zug-Kriechmodul (0,5% 1000h)	ISO 899-1	1400	MPa
Biegefestigkeit	ISO 178	97	MPa
Biegewechselfestigkeit (1E7 Lastwechsel)	ASTM D671	31	MPa
Izod-Schlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 180/1C	930	KJ/m ²
Izod-Schlagzähigkeit bei -30 °C	ISO 180/1C	100	KJ/m ²
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei -30 °C	ISO 180/1A	5,5	KJ/m ²
Charpy-Schlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 179/1eU	210	KJ/m ²
Charpy-Schlagzähigkeit bei -30 °C	ISO 179/1eU	190	KJ/m ²
Charpy-Kerbschlagzähigkeit bei -30 °C	ISO 179/1eA	5,5	KJ/m ²
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 180/4A	60	J/m
Gleitkoeffizient gegen Stahl im Trockenlauf		0,32-0,40	-
Gleitverschleiß relativ zur Flächenpressung		54	(µm/km)/MPa
Kriechstromfestigkeit CTI M	IEC 60112	600M	-
Spezifische Wärmekapazität	IEC 1006	1,47	J/g K
Vicat-Erweichungstemperatur B	ISO 306 VST/B/50 (50 N)	150	°C
Sauerstoffindex LOI	ISO 4589	15	%

Chemische Beständigkeiten

mineralische Schmierstoffe	➕ beständig
aliphatische Kohlenwasserstoffe	➕ beständig
aromatische Kohlenwasserstoffe	➕ beständig
Benzin	➕ beständig
schwache Mineralsäuren	➕ beständig
starke Mineralsäuren	➖ unbeständig
schwache organische Säuren	➕ beständig
starke organische Säuren	➖ unbeständig
oxidierende Säuren	➖ unbeständig
schwache Laugen	➕ beständig
starke Laugen	➕ beständig
Trichlorethylen	➖ unbeständig
Perchlorethylen	➕ beständig
Aceton	➕ beständig
Alkohole	➕ beständig
heißes Wasser (Hydrolysebeständigkeit)	➕ beständig
UV-Licht und Witterung	☼ bedingt beständig

Tab. 9: Materialbeschreibung zu Polyoxymethylen Copolymer (POM-C) (Quelle: Firma Kern GmbH 2009)

3.4 Beispiel 4: Flugzeugtragflächen aus Kunststoff

3.4.1 Erläuterungen zum Projekt

Auch im Flugzeugbau werden Metalle sukzessive durch Kunststoffteile, welche besonders in diesem Bereich höchsten Ansprüchen und strengsten Prüfungen gerecht werden müssen, ersetzt. Wird deshalb ein Kunststoffteil im Flugzeug (besonders bei tragenden Teilen) verwendet, steigert dies allgemein gesehen die Akzeptanz von Kunststoffen um ein Vielfaches. In Fachzeitschriften wird immer öfter über neue marktreife Entwicklungen berichtet, die Fliegen sicherer und Spritsparender machen. Einer der wohl kritischsten Elemente beim innovativen Flugzeugbau ist der Flügel, da dieser den höchsten Belastungen ausgesetzt ist.

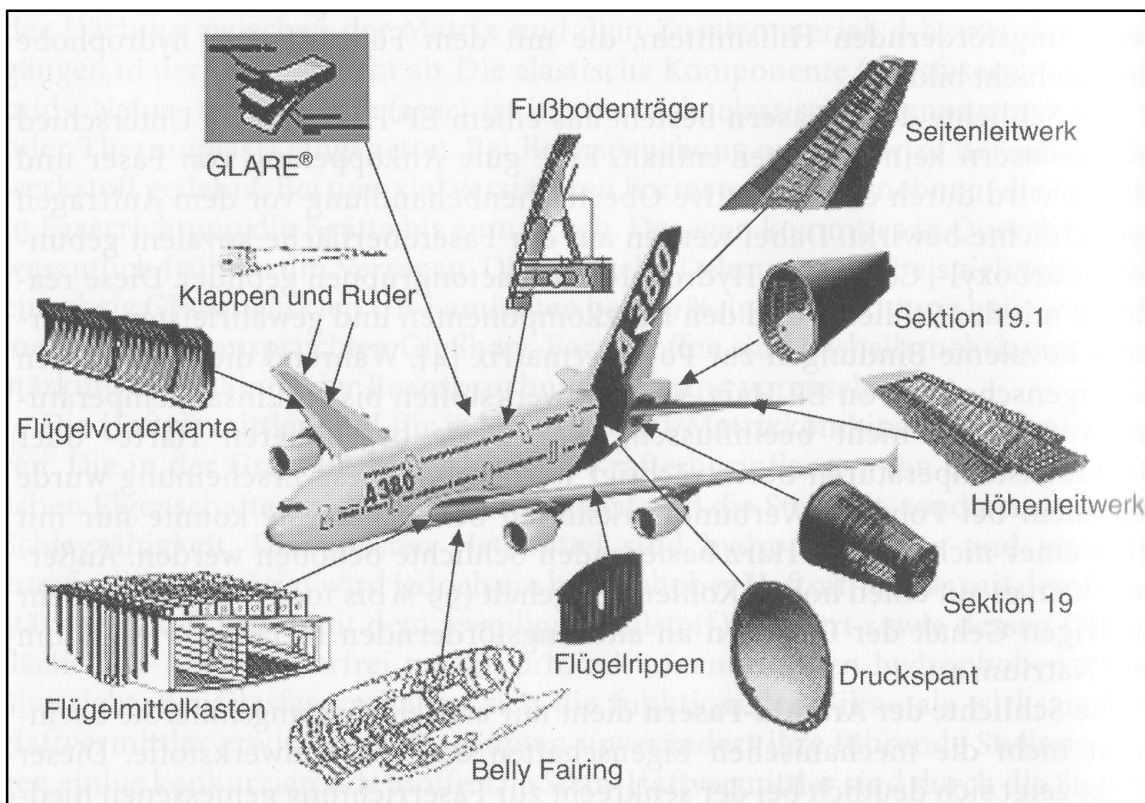


Abb. 40: Wichtigste Verbundwerkstoffanwendungen im A380 (Quelle: Domininghaus 2005, S. 192)

Eine tragende Rolle im Flugzeugbau spielt der Kunststoffbereich der faserverstärkten Composites (CFK) aus dem Hochleistungs-Kunststoff Fortron (Polyphenylensulfid/PPS) der Firma Ticona (D)¹. Im Flugzeugbau dauert es wegen der hohen Anforderungen Jahre, bis ein neuer Werkstoff ausreichend getestet, freigegeben und dann möglicherweise verwendet wird. PPS mit der Markenbezeichnung „Fortron“ hat diese Hürde genommen. Gerade durch

¹ Die Firma Ticona ist der Alleinentwickler des Materials Fortron und hält das Patent darauf.

diese Weiterentwicklung können und werden immer mehr Metallteile bei steigenden Materialanforderungen durch Kunststoff ersetzt.

Besondere Vorteile der CFK (Ehrenstein 2006, S. 10f):

- Richtungsabhängige Eigenschaften
- Hervorragende dynamische Eigenschaften
- Sehr gute Korrosions- und Medienbeständigkeit
- Feuerresistent
- Integrale Fertigung großer, komplexer Strukturen
- Gutes Crashverhalten

Vorteile der Leichtmetalle liegen in:

- Entwicklung neuer Aluminium-Lithium-Legierungen
- Neue Verbindungstechniken wie Laserstrahl- und Reib-Rühr-Schweißen

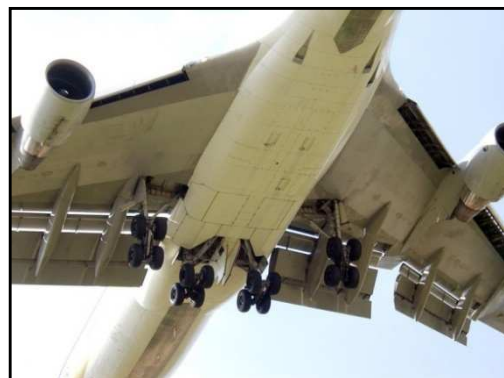


Abb. 41: Flugzeugtragflächen (Quelle: Boeing Company 2008)

Die wesentlichen Vorteile durch den Einsatz von PPS sind die leichteren Bauteile und dadurch geringerer Treibstoffverbrauch bei gleichzeitig steigender Passagierzahl und erhöhten Reichweiten. Das ist angesichts der geforderten Senkung der CO₂-Emission ein treibender Aspekt in der Materialforschung. Flugzeugbauer setzen deshalb auf besonders leichte Baumaterialien. Dazu gehören metallische Leichtbauwerkstoffe, ebenso wie Faserverbundkunststoffe, insbesondere kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe, kurz CFK.

Was die Robustheit des Kunststoffes angeht, so übertrifft er sogar Aluminium. PPS ist nahezu unbegrenzt lagerbar. Im Laufe der Jahre können die Leichtmetalle durch das Einsprühen mit Enteisungsmitteln korrodieren, dagegen hält der Verbundwerkstoff auf Basis von PPS diesen Chemikalien stand. Weitere Materialeigenschaften, die für den Einsatz

dieses Kunststoffes sprechen, sind seine hohe Steifigkeit, hohe Festigkeit, Beständigkeit bei hohen Temperaturen, hohe Maßhaltigkeit, hohe Chemikalienbeständigkeit und gute elektrische Eigenschaften (vgl. Tab. 10).

Ein Problem stellt die bedingte Beständigkeit gegen UV-Licht und Witterung dar. Durch Lackierung der Bauteile mit speziellen UV- und witterungsbeständigen Lacken wird diesem negativen Effekt entgegengewirkt.

Bislang war das Material nur im Flugzeuginneren verbaut worden. Zurzeit sind etwa 30 bis 40 Bauteile aus dem Werkstoff, darunter Türen, Klappen, Treppen und Bodenplatten. Mit den neuen Airbus-Modellen (siehe weiter unten) werden nun bei jedem Flugzeug etwa 200 kg PPS eingesetzt. Das bringt eine Gewichtseinsparung von etwa 20 %; gleichzeitig sinken die Herstellungskosten ebenfalls um über 20 %.

Beispielsweise sollen in Zukunft rund 20 % der Komponenten des Super-Airbus für 550 Passagiere aus faserverstärkten Kunststoffen (CFK) bestehen. Für die Flügelnasen des A380 bildet Fortron die Matrix für die leichten und widerstandsfähigen Verbundwerkstoffe. Bei den Airbustypen A340-500“ und A340-600“ wird für die Außenhaut erstmals ein Verbundwerkstoff mit dem Hochleistungspolymer Fortron statt Aluminium verwendet. Noch ist es nur ein Stück Flügelvorderkante zwischen Rumpf und Motor, doch weitere Anwendungen sind bereits angedacht.

Bei den Klappen- oder Querrudern und beim Kielträger findet sich in den neuen Bautypen ebenfalls der Verbundwerkstoff. Auf lange Sicht will auch die amerikanische Flugzeugindustrie das neue Material nutzen.

Um den Ansprüchen endgültig gerecht zu werden sollten noch folgende Punkte verbessert werden (Ehrenstein 2006, S. 12):

- Verbesserte Infusionstechnik mit niedrigerem Materialpreis gegenüber Prepregverfahren (Halbzeugzwischenstufe)
- Aufwendige Prepreg-Halbzeuglagerung mit begrenzter Lager- und Verarbeitungszeit
- Prepregs mit hohem Schneid- und Verlegeaufwand (hoher Verschnitt)
- Unbefriedigende Dickentoleranzen von 10 % bei einseitigem Werkzeug (Ausgleichsmassen bei spätem Fügen)
- Harze für geringe und langzeitige Infusionen bei niedrigen Temperaturen mit Viskositäten von $< 200 \text{ mPa}\cdot\text{s}$; $> 4 \text{ h}$ gute hot/wet-Eigenschaften, hohe Zähigkeit

Das Rohmaterial stellt Ticona in Frankfurt am Main her, in Österreich verarbeitet Lipp-Terler den Kunststoff zu dünnen Folien und die Ten Cate, Nijverdal in den Niederlanden, verpresst die Folien mit Kohlenstoff- oder Glasfasern bei 300°C zu festen Composite-Platten. Diese schneiden die Flugzeugbauer in die richtige Größe. Die Platten müssen dann nicht wie Aluminium vernietet, sondern können verschweißt werden. Löcher für Nieten in hoch beanspruchten Bauteilen sind mögliche Schwachstellen (Scherwirkung). Noch ist das Bauteil am Airbus nur etwa 6 m lang und 1 m breit, verglichen mit dem Flugzeugkoloss also winzig. Doch schon der „Superjumbo A380“ soll sogar mehr als 2 to PPS enthalten. Das wäre zehn Mal mehr als in den aktuellen Bautypen.

Bei all diesen Vorteilen stellt sich die Frage, ob es möglich wäre, ein Flugzeug zu 100 % aus Hochleistungspolymeren zu bauen. Dies ist allerdings aus folgenden Gründen (zurzeit) nicht realisierbar: Beim Flügel z.B. sind tragende Konstruktionen aus massivem Metall nötig, da an ihnen die tonnenschweren Turbinen hängen. Vorstellbar wäre, dass eines Tages PPS einen überwiegenden Teil der Flügelhaut ausmacht; zumindest zeigt die Entwicklung in diese Richtung.

Ein weiterer Aspekt ist das Nieten der Bauteile. Sollen zwei CFK-Bauteile miteinander verbunden werden, kommt bisher vor allem die Niettechnik zum Einsatz. Besonders in CFK-Strukturen stellen Nietlöcher allerdings ein Problem dar. Sie stören den Kraftfluss in den CFK-Strukturen und vermindern die Belastbarkeit des Materials. Aus diesem Grund beschäftigen sich beispielsweise Forscher am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) in Bremen mit Klebprozessen, die bereits für CFK-Materialien zum Einsatz kommen. Da aber dieser Klebprozess noch nicht alle Prüfungen der Luftfahrt bestanden hat, setzen die Luftfahrtingenieure auf das Hybridfügen - eine Kombination aus Niettechnik und speziellen Klebverfahren. Beim Hybridfügen sind die CFK-Materialien mit weniger Nietlöchern durchsetzt. Die besonders hohe Belastbarkeit, die diese Werkstoffe auszeichnet, kommt so besser zum Tragen, denn das Kleben erlaubt eine bessere flächige Kraftverteilung. Das Nieten ist zwar in den kommenden Jahren nicht aus dem Flugzeugbau wegzudenken, doch ohne strukturelles Kleben von Primärstrukturen - wie Rumpf, Flügel und Leitwerke - wird die Luftfahrt durch den verstärkten Kunststoffeinsatz bald nicht mehr auskommen.

Eine innovative Flugzeugform, die den verstärkten Einsatz von Kunststoff unterstützt, ist diejenige des Nurflügel-Flugzeugs. Durch die besondere Form des Nurflügels kann der Spritverbrauch gesenkt werden, da dadurch bessere Gleiteigenschaften gegeben sind, das gesamte Flugzeug aerodynamischer geformt ist und ein höherer Auftrieb entsteht. Durch das Zusammenwirken dieser Eigenschaften wird weniger Motorleistung benötigt und folglich weniger Spritverbrauch, um dieselbe Leistung der jetzigen Flugzeugtypen zu erreichen.

3.4.2 Materialbeschreibung

Polyphenylensulfid mit 40% Glasfaser (PPS GF40)			
Werkstoffnummer		1801	
Dichte	ISO 1183	1,65	g/cm ³
<u>Mechanische Eigenschaften</u>			
Zugfestigkeit	ISO 527	150	MPa
Reißdehnung	ISO 527	1,1	%
Zug-E-Modul	ISO 527	16000	MPa
Härte Shore (A/D) oder Rockwell (R/L/M)	ISO 868, ISO 2039-2	D91	-
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 180/1A	8	KJ/m ²
Charpy-Kerbschlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 179/1eA	7	KJ/m ²
<u>Elektrische Eigenschaften</u>			
Dielektrizitätszahl bei 50 Hz	IEC 60250	3,9	-
Dielektrizitätszahl bei 1 MHz	IEC 60250	3,8	-
Dielektrischer Verlustfaktor bei 50 Hz	IEC 60250	20	1E-4
Dielektrischer Verlustfaktor bei 1 MHz	IEC 60250	20	1E-4
Durchschlagfestigkeit	IEC 60243-1	17	kV/mm
Dicke für Durchschlagfestigkeit		1,0	mm
Spezifischer Durchgangswiderstand	IEC 60093	2E14	Ohm · m
Oberflächenwiderstand	IEC 60093	5E16	Ohm
Kriechstromfestigkeit CTI	IEC 60112	125	-
<u>Thermische Eigenschaften</u>			
Wärmeleitfähigkeit	DIN 52 612	0,30	W/K m
Längenausdehnung längs quer zur Fließrichtung	ISO 11359	20 40	10 ⁻⁶ /K
Schmelz- bzw. Glasübergangstemperatur	ISO 11357	278	°C
Wärmeformbeständigkeit A	ISO 75 HDT/A (1,8 MPa)	260	°C
Wärmeformbeständigkeit B	ISO 75 HDT/B (0,45 MPa)	260	°C
max. Temperatur kurzzeitig		260	°C
max. Temperatur dauernd		220 ⁵⁾	°C
min. Anwendungstemperatur		-200	°C
<u>Sonstige Eigenschaften</u>			
Wasseraufnahme bei Normalklima	ISO 62	0,01	%
Wasseraufnahme bei Wasserlagerung	ISO 62	0,02	%
Brennverhalten nach UL 94	IEC 60695-11-10	V-0	-
Dicke für UL 94		0,38	mm
Transparenz (opak/transluzent/klarsichtig)		opak	
Rohstoff		Ryton R-4 (Chevron Phillips)	
⁵⁾ : Wärmealterung nach UL 746 (RTI) Mechanical W/O Imp., 40 000 h			

<u>Spezielle Eigenschaften</u>			
Biegefestigkeit	ISO 178	200	MPa
Biegewechselfestigkeit (1E7 Lastwechsel)	ASTM D671	45	MPa
Izod-Schlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 180/1C	30	KJ/m ²
Izod-Schlagzähigkeit bei -30 °C	ISO 180/1C	30	KJ/m ²
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei -30°C	ISO 180/1A	8	KJ/m ²
Charpy-Schlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 179/1eU	16	KJ/m ²
Charpy-Schlagzähigkeit bei -30 °C	ISO 179/1eU	17	KJ/m ²
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 180/4A	70	J/m
Gleitkoeffizient gegen Stahl im Trockenlauf		0,55	-
Kriechstromfestigkeit CTI M	IEC 60112	125M	-
Spezifische Wärmekapazität	IEC 1006	1,18	J/g K
Vicat-Erweichungstemperatur A	ISO 306 VST/A/50 (10 N)	260	°C
Vicat-Erweichungstemperatur B	ISO 306 VST/B/50 (50 N)	260	°C
Sauerstoffindex LOI	ISO 4589	47	%
<u>Chemische Beständigkeiten</u>			
mineralische Schmierstoffe			+beständig
aliphatische Kohlenwasserstoffe			+beständig
aromatische Kohlenwasserstoffe			⊖bedingt beständig
Benzin			+beständig
schwache Mineralsäuren			+beständig
starke Mineralsäuren			⊖bedingt beständig
schwache organische Säuren			+beständig
starke organische Säuren			+beständig
oxidierende Säuren			⊖unbeständig
schwache Laugen			+beständig
starke Laugen			⊖bedingt beständig
Trichlorethylen			+beständig
Perchlorethylen			+beständig
Aceton			+beständig
Alkohole			+beständig
heißes Wasser (Hydrolysebeständigkeit)			+beständig
UV-Licht und Witterung			⊖bedingt beständig

Tab. 10: Polyphenylensulfid mit 40 % Glasfaser (PPS GF 40) (Quelle: Firma Kern GmbH 2009)

3.5 Beispiel 5: Rechen für Turbineneinlauf aus Kunststoff

Der Wasserkraftwerksbau zählte bislang zu den klassischen Stahl- und Betonbaubereichen. Aber auch hier hält – vor allem beim Rechen - der Kunststoff Einzug. Ein wichtiger Grund für diese Alternative ist unter anderem, dass die Preise für Stahl geradezu explodiert sind. Weiters werden immer häufiger ganze Turbinenblöcke gebaut, d.h. der Ein- und Auslass, sowie Turbine und Rechen bilden eine Einheit. Dies hat den Vorteil, dass bei Reversionen die ganze Einheit komplett mit einem Kran herausgehoben werden kann. Hier spielt allerdings das Gewicht eine maßgebende Rolle, denn ein Kran ist mit einer bestimmten Hublast limitiert². Bei der Turbineneinheit selbst ist die Gewichtsoptimierung bereits ausgereizt. Eine signifikante Gewichtsreduktion kann nur noch beim Rechen, der einen Großteil des Gesamtgewichts ausmacht, erreicht werden. Wiederum bieten sich hier alternative Werkstoffe wie Kunststoff an. Damit kann z.B. eine Gewichtsersparnis von bis zu 40 % erzielt werden.



Abb. 42: Abbildung von möglichem Treibgut (Quelle: Firma Hans Künz GmbH 2008)

3.5.1 Funktionsbeschreibung

Rechen für Turbineneinlauf dienen zur Abhaltung von Treibgut und mitgeführtem Gestein im Flusslauf (z.B. Holzstämme, Abfälle, Geröll etc.). Ansonsten würden diese Teile in die Turbine geraten und große Schäden anrichten. Aufgrund dieser Gegebenheiten sind die Anforderungen an solche Rechen sehr hoch. Rechen müssen Belastungen, die auf eine

² Es wäre möglich, einen Kran zu dimensionieren, der diese Lasten von mehreren hundert Tonnen heben und befördern könnte, allerdings würde die Größe des Krans die Platzverhältnisse bei einem Staudamm bei Weitem überschreiten.

große Fläche wirken, sowie starke Stöße, kontinuierlichen Druck, Vereisung, Abrieb (z.B. durch Greifer der Rechenreinigungsmaschine) etc. standhalten und dies über lange Zeiträume hinweg.

Vor der Konstruktion des Rechens muss untersucht werden, in welcher Form, Menge und Geschwindigkeit Treibgut auf das Rechenfeld treffen wird. Aus dieser Erkenntnis werden die Rechenfelder dimensioniert. Daraus ergeben sich Dicke und Anzahl der Rechenstäbe, Abstände zwischen den Stäben, Durchmesser der horizontalen Verbindungsstäbe, sowie Größe der einzelnen Rechenfelder.

Das Entfernen des Treibgutes wird von sogenannten Rechenreinigungsmaschinen (RRM) bewerkstelligt. Diese kann man sich als Bagger vorstellen, wobei der Abstand der Zähne des Greifers an den Rechen angepasst ist, damit auch Treibgut, das zwischen den Rechenstäben feststeckt, mit abgetragen werden kann.

3.5.2 Bisher verwendetes Material

Rechen werden hauptsächlich aus S235JRG gefertigt, in Sonderfällen wird auch 1.4301 eingesetzt. Der Rechen muss – unabhängig vom Wasserstand – über seine gesamte Höhe und Breite der gleichen Belastung standhalten. Der Wasserspiegel wird bei einem Wasserkraftwerk relativ konstant gehalten, wobei dieser innerhalb eines Bereiches zwischen zwei bis drei Meter steigen oder sinken kann. Innerhalb dieses Bereiches ist der Rechen am Anfälligsten für Korrosion.

Wie bereits oben erwähnt, wird der Rechen durch eine RRM gereinigt. Beim „Ausschaben“ des verklemmten Treibgutes kommt es häufig zu einer Verformung der vertikalen Stäbe, die leider nicht reversibel ist. Ebenso bewirkt ein Frost-Tau-Wechsel zusätzlich eine Schädigung an den vertikalen Stäben.

3.5.3 Kunststoffeinsatz

Im Rahmen einer Ausschreibung für ein Bauprojekt in den USA³ im Jahr 2002 wurde erstmals ernsthaft über den Einsatz von Kunststoff bei der Fertigung von Rechen nachgedacht. Ziel war es, die Turbinenblöcke um bis zu 30 % leichter zu machen, damit sie bei einer Revision als Ganzes von einem Kran herausgehoben werden können. Die definierten Anforderungen an das Material waren:

³ Für dieses Projekt, an dem mehrere Unternehmen beteiligt waren, leistete auch die Firma Hans Künz GmbH einen maßgeblichen Teil der Entwicklungsarbeit für die Gewichtsoptimierung der Turbinenblöcke. Leider wurde das Projekt aufgrund mangelnder Finanzierung noch nicht realisiert.

- Abriebfestigkeit
- UV-Beständigkeit
- Hitze- und Frostbeständigkeit
- Schlagfestigkeit
- Langlebigkeit (geringe Versprödung)
- Elastizität (reversible Deformation)
- Niedriges Gewicht
- Formstabilität und Maßhaltigkeit

Diese Anforderungen kann das Material PE-HD (Polyethylen mit hoher Dichte) zur Genüge abdecken. Der errechnete Gewichtsvorteil, der durch den Einsatz dieses Kunststoffmaterials erreicht werden könnte, liegt sogar bei 50 % gegenüber einem herkömmlichen Rechen. Ein weiterer Vorteil dieses Materials ist die relativ einfache Herstellung von strömungsoptimierten Profilen durch Strangpressverfahren (Verminderung von Strömungsverlusten und Wirbelbildung). Bei Tests stellte sich heraus, dass das Material bessere Abriebeigenschaften aufweist als Stahl. Auch bei der Überprüfung der Elastizität schnitt das Material sehr gut ab, da es im Gegensatz zu Stahl auch bei einem hohen Durchbiegungsgrad wieder in die Ausgangsposition zurückkehrt.

Der hohe Gewichtsvorteil birgt allerdings auch einen Nachteil in sich, da das Eigengewicht des Rechens den erzeugten Auftrieb nicht übersteigt. Deshalb ist für die Verankerung des Rechens eine zusätzliche Befestigung notwendig (vorzugsweise werden dafür C-Profile als Schiene verwendet, d.h. der Rechen wird quasi geführt).

Die Profile aus PE-HD können auch in kleinen Mengen (ab einer Tonne) kostengünstig hergestellt werden. Im Gegensatz dazu muss bei Stahl eine Mindestmenge von 20 bis 50 to, je nach Profil, abgenommen werden um überhaupt produziert zu werden.

3.5.4 Komponentenbeschreibung

Vertikale Profile:

Bestehen aus hochfestem, hoch beanspruchbaren, abriebresistentem Polyethylen mit hoher Dichte.

Horizontale Verbindungsstäbe:

Produziert aus ultra high strength mit hervorstehenden Fiberglass-Stäben. Diese Stäbe erlauben es dem Rechen, hohe Lasten aufzunehmen und danach wieder in seine ursprüngliche Form (Position) zurück zu kehren. Die Stäbe haben einen Durchmesser von 1-1/4" (32 mm) mit verschraubtem Ende.

Abstandshalter:

Dieses Material ist aus UHMW Polyethylen Rohren hergestellt (Längenzuschnitt je nach Anforderung).

Endstücke:

Das sind injizierte Formstücke aus Polyamid 66 (PA 66, genaue Werte vgl. Tab. 11), besser bekannt als Nylon mit eingepresstem Gewinde. Das Material PA 66 quillt auf, sobald es mit Wasser in Berührung kommt. Dadurch sind diese Endverschlüsse selbstsichernd, somit entsteht eine fixe Verbindung die nicht nachjustiert werden muss.

Installation:

Wurde bereits oben beschrieben (Es entsteht ein Auftrieb, der größer ist als bei Stahl. Daher muss der Rechen zusätzlich an der Wasserunterseite befestigt werden. Eine Möglichkeit diesem zu entgehen ist Führungsschienen an den Betonstehern zu montieren).

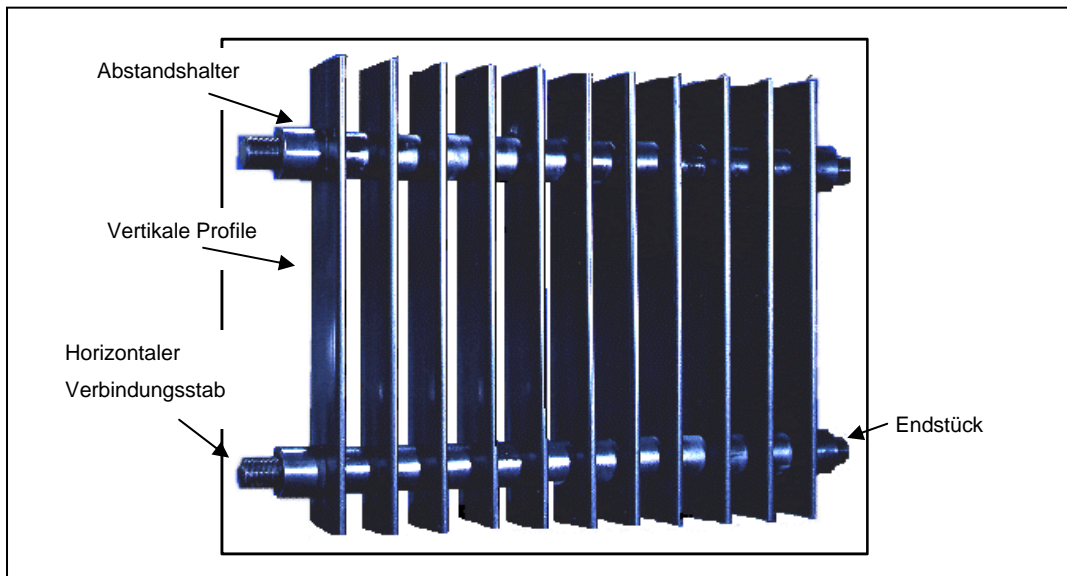


Abb. 43. Kunststoffrechen – Komponentenbeschreibung (Quelle: eigene Darstellung)



Abb. 44: Abbildung eines Stahlrechens nach zehn Jahren Gebrauch (Quelle: Firma Hans Künz GmbH 2008)

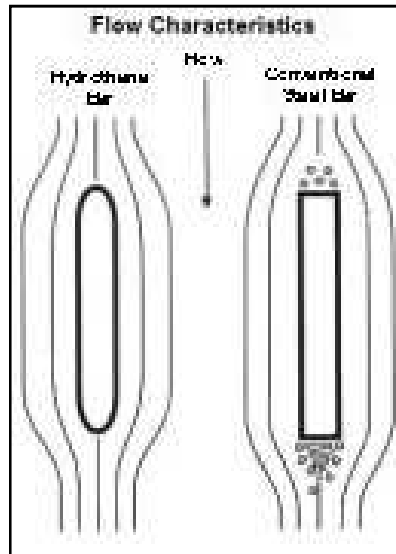


Abb. 45: Abbildung einer Strömung
(Quelle: Firma Hydrothane Systems)



Abb. 46: Abbildung eines Kunststoffrechens (Quelle: Firma Hydrothane Systems)



Abb. 47: Abbildung eines Rechens aus Stahl (Quelle: Firma Hans Künz GmbH 2008)

Polyamid 66 (PA 66)			
Werkstoffnummer		1142	
Dichte	ISO 1183	1,14	g/cm ³
Probekörperzustand		trocken/luftfeucht	
Mechanische Eigenschaften			
Streckspannung	ISO 527	85/50	MPa
Reißdehnung	ISO 527	40/150	%
Zug-E-Modul	ISO 527	3100/1100	MPa
Kugeldruckhärte	ISO 2039-1	160/100	MPa
Norm für Kugeldruckhärte		H358/30	
Härte Shore (A/D) oder Rockwell (R/L/M)	ISO 868, ISO 2039-2	D84/D74	-
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 180/1A	5,5/NB	KJ/m ²
Charpy-Kerbschlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 179/1eA	5,0/20	KJ/m ²
Thermische Eigenschaften			
Wärmeleitfähigkeit	DIN 52 612	0,23	W/K m
Längenausdehnung längs quer zur Fließrichtung	ISO 11359	70 100	10 ⁻⁶ /K
Schmelz- bzw. Glasübergangstemperatur	ISO 11357	260	°C
Wärmeformbeständigkeit A	ISO 75 HDT/A (1.8 MPa)	75	°C
Wärmeformbeständigkeit B	ISO 75 HDT/B	220	°C

(0,45 MPa)			
max. Temperatur kurzzeitig	200	°C	
max. Temperatur dauernd	101 ⁴⁾	°C	
min. Anwendungstemperatur	-40	°C	
<u>Sonstige Eigenschaften</u>			
Wasseraufnahme bei Normalklima	ISO 62	2,8	%
Wasseraufnahme bei Wasserlagerung	ISO 62	8,5	%
Brennverhalten nach UL 94	IEC 60695-11-10	V-2	-
Dicke für UL 94		0,40	mm
Transparenz (opak/transluzent/klarsichtig)		opak	
Rohstoff		Ultramid A3K (BASF)	
⁴⁾ : Wärmealterung, Abfallen der Zugfestigkeit um 50 % nach 20 000 h NB: Probekörper nicht gebrochen			
<u>Spezielle Eigenschaften</u>			
Streckdehnung	ISO 527	5/20	%
Zug-Kriechmodul (0,5% 1000h)	ISO 899-1	-/700	MPa
Biegegewichselfestigkeit (1E7 Lastwechsel)	ASTM D671	30	MPa
Izod-Schlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 180/1C	NB/NB	KJ/m ²
Izod-Schlagzähigkeit bei -30 °C	ISO 180/1C	190/250	KJ/m ²
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei -30°C	ISO 180/1A	6,0/5,5	KJ/m ²
Charpy-Schlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 179/1eU	NB/NB	KJ/m ²
Charpy-Kerbschlagzähigkeit bei -30 °C	ISO 179/1eA	4,0/-	KJ/m ²
Gleitkoeffizient gegen Stahl im Trockenlauf		0,37-0,50	-
Gleitverschleiß relativ zur Flächenpressung		6,0	(µm/km)/MPa
Kriechstromfestigkeit CTI M	IEC 60112	550M	-
Spezifische Wärmekapazität	IEC 1006	1,70	J/g K
Vicat-Erweichungstemperatur B	ISO 306 VST/B/50 (50 N)	250	°C
Sauerstoffindex LOI	ISO 4589	28	%
NB: Probekörper nicht gebrochen			
<u>Chemische Beständigkeiten</u>			
mineralische Schmierstoffe		☑ beständig	
aliphatische Kohlenwasserstoffe		☑ beständig	
aromatische Kohlenwasserstoffe		⚠ beständig	
Benzin		☑ beständig	
schwache Mineralsäuren		⚠ bedingt beständig	
starke Mineralsäuren		☹ unbeständig	
schwache organische Säuren		⚠ bedingt beständig	

starke organische Säuren	☹️unbeständig
oxidierende Säuren	☹️unbeständig
schwache Laugen	☺️beständig
starke Laugen	⚠️bedingt beständig
Trichlorethylen	☺️beständig
Perchlorethylen	☺️beständig
Aceton	☺️beständig
Alkohole	☺️beständig
heißes Wasser (Hydrolysebeständigkeit)	⚠️bedingt beständig
UV-Licht und Witterung	⚠️bedingt beständig

Tab. 11: Materialbeschreibung zu Polyamid 66 (Quelle: Firma Kern GmbH 2009)



Abb. 48: Abbildung von täglich angeschwemmtem Treibgut
(Quelle: Firma Hans Künz GmbH 2008)



4 Umweltproblematik

Da aus Kunststoffen auch Wegwerfartikel gefertigt werden, ergibt sich zwangsläufig das Problem der Entsorgung. Die polymeren Bestandteile der Kunststoffe sind zum einen nicht wasserlöslich und zum anderen nicht in der Lage, die Zellmembranen von Mikroorganismen zu passieren; das heißt, eine Wechselwirkung mit lebenden Organismen ist außer bei den biologisch abbaubaren Kunststoffen weitgehend ausgeschlossen. Dies hat zwar den Vorteil, dass Polymere als gesundheitlich unbedenklich eingestuft werden können, aber eine Umwandlung in der belebten Natur ebenso ausgeschlossen werden kann. Kunststoffe verrotten also nur sehr langsam. Mikroorganismen können Kunststoffe im Grunde nur durch extrazelluläre Enzyme verarbeiten, die das Material in kleinere Bestandteile zerlegen, die dann von der Zelle aufgenommen werden können. Allerdings sind die Enzyme zu groß, um effektiv in das verrottende Material einzudringen, so dass dieser Prozess nur als Oberflächenerosion ablaufen kann.

Toxische Zwischenstufen der biochemischen Prozesse können sich auch, wenn sie nicht weiter umgesetzt werden können, in der Natur anreichern. Gefahr geht auch von den Additiven der Kunststoffe, wie Weichmachern, Farbstoffen oder Flammschutzmitteln aus. Man verfolgt daher verschiedene Strategien, der Abfallberge Herr zu werden.

Gelangen biologisch nicht abbaubare Kunststoffe in die Umwelt, werden sie zu einer Gefahr. So treiben Millionen Tonnen Kunststoffmüll in einem so genannten Müllstrudel im Pazifik. Jedes Jahr tötet dieser Müll Hunderttausende Tiere. Nach einer Studie der UNEP⁴ befinden sich in diesem Strudel bis zu 18.000 Kunststoffteile auf jedem Quadratkilometer Meeresfläche. Auf ein Kilogramm Plankton kommen hier sechs Kilogramm Kunststoff. Die Größe des Müllstrudels entspricht etwa der Größe des US-Bundesstaates Texas.

4.1 Rohstoffliche Verwertung

Durch Pyrolyse lassen sich Kunststoffe wieder in die jeweiligen Monomere oder weitere petrochemisch verwertbare Stoffe, wie Methanol oder Synthesegas spalten. Für die Gewinnung der Monomere ist aber ebenfalls die Verfügbarkeit sortenreinen Materials Voraussetzung. Beispiele sind das Hamburger Verfahren, das zur Zeit vom Energiekonzern BP betrieben wird und sowohl zur Gewinnung von Monomeren, als auch petrochemischer Rohstoffe dient und das von Walter Michaeli und anderen entwickelte Verfahren der degradativen Extrusion, das in der Lage ist vermischte Kunststoffabfälle in rohstofflich verwertbare Gase, Wachse und Öle umzuwandeln. Diese Verfahren werden naturgemäß vor allem für die Verwertung von Mischkunststoffen genutzt, die sich nur unter

⁴ United Nations Environment Programme (UNEP)

großem Aufwand trennen lassen würden.



Abb. 50: Verschmutzung eines Rechens durch Kunststoffabfälle (Quelle: Firma Hans Künz GmbH 2008)

4.2 Gesundheitsgefahren

Die Polymerstrukturen der Kunststoffe selbst gelten, da die Zellen lebender Organismen nicht in der Lage sind sie aufzunehmen, als biologisch inaktiv und somit vollkommen unbedenklich. Gefahr kann allerdings von den zugesetzten Additiven ausgehen. Diese können an der Oberfläche des Materials austreten (Ausschwitzen). Aus diesem Grunde gelten für Lebensmittelverpackungen, Kunststoffe in der Medizin und ähnliche Anwendungen besonders strenge Auflagen hinsichtlich der Verwendung von Additiven. Die in solchen Bereichen eingesetzten Kunststoffe bedürfen einer Zulassung, beispielsweise durch die FDA⁵.

In diesem Zusammenhang ist in der Vergangenheit vor allem Weich-PVC in die Kritik geraten, da diesem Kunststoff besonders große Mengen an Weichmachern zugesetzt werden. Es ist daher schon seit langem nicht mehr als Verpackung für Lebensmittel zugelassen. Ebenso ist in der Europäischen Union Herstellung und Vertrieb von Spielzeug für Kinder bis drei Jahre aus diesem Material untersagt. Allerdings werden bis heute vor allem in Fernost produzierte Spielzeuge aus Weich-PVC verkauft.

⁵ Food and Drug Administration (FDA)

5 Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, anhand von fünf Praxisbeispielen aufzuzeigen, inwieweit Kunststoffe bereits Metalle ersetzen können. Einerseits war mir bekannt, dass immer mehr Komponenten, nicht nur aus dem alltäglichen Leben, sondern auch Spezialteile immer häufiger durch Kunststoff ersetzt werden, andererseits wird über Kunststoff äußerst wenig und selten berichtet, er fristet gegenüber Stahl noch ein Schattendasein. Bestes Beispiel ist die Formel 1, in der nahezu das gesamte Auto bereits aus Kunststoff besteht, aber es wird hauptsächlich über neue Metalllegierungen berichtet. Bei den erläuterten Beispielen handelt es sich um klassische Spezialteile. Ein weiterer Grund für mich dieses Thema zu wählen war, dass die allgemeine Meinung über Kunststoff oftmals mit negativen Assoziationen behaftet ist. Dabei wird häufig der Umweltaspekt angeführt, d.h. Kunststoff belastet die Umwelt in relativ hohem Maße, da dieses Material nicht durch natürliche Prozesse abgebaut werden kann. Weiters wird Kunststoff vorwiegend aus einem fossilen Energieträger (Erdöl) gewonnen. Dahingegen bewirkt der Einsatz von Kunststoff bei Flugzeugtragflächen Treibstoff und somit den CO₂-Ausstoß in spürbarem Ausmaß zu verringern. Kunststoff-Rechen fristen ein Schattendasein, obwohl hier nur Positives zu berichten ist. Der Stahlwasserbau ist allerdings ein von stahlbegeisterten Ingenieuren dominierter Bereich und es wird deshalb noch eine bestimmte Zeit dauern, bis solche Rechen nicht nur in den USA, sondern auch in Europa verbaut werden. Weiters beweisen diese Beispiele, dass der Kunststoff ein Material ist, der durch kleinste (kostengünstige) Änderungen im Gefüge, durch Vermischungen etc. zu Höchstleistungen getrieben werden kann.

In dieser Arbeit wird auch aufgezeigt, dass das Material Kunststoff noch lange nicht an seine Grenzen in Bezug auf weitere Einsatzgebiete gestoßen ist, und wir noch viele neue Errungenschaften erwarten dürfen.

Literaturverzeichnis

Bücher:

Domininghaus 2005

Domininghaus, Hans: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften. 6. neubearb. Aufl. Berlin: Springer, 2005

Ehrenstein 1999

Ehrenstein, Gottfried W.: Polymer-Werkstoffe. 2. neubearb. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 1999

Ehrenstein 2006

Ehrenstein, Gottfried W.: Faserverbund-Kunststoffe. 2. neubearb. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2006

Erhard 2004

Erhard, Gunter: Konstruieren mit Kunststoffen. 3. neubearb. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2004

Gächter/Müller 1990

Gächter, Reinhard; Müller, Helmut: Kunststoffadditive. 3. Aufl. München: Carl Hanser Verlag 1990

Michler 1992

Michler, Georg H.: Kunststoff-Mikromechanik, München: Carl Hanser Verlag, 1992

Oberbach/Saechtling/Pabst 2004

Oberbach, Karl; Saechtling, Hansjürgen; Pabst, Franz: Kunststoff-Taschenbuch. 29. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2004

Schwarz/Ebeling/Schirber 2002

Schwarz, Otto; Ebeling, Friedrich W.; Schirber, Harald ..: Kunststoffkunde. 7. neubearb. Aufl. Würzburg: Vogel, 2002

Quellen aus dem Internet:

Arbeitsgemeinschaft PVC und UMWELT e.V.: Welt-Kunststoffverbrauch 2000-2010. URL:
http://www.agpu.de/fileadmin/user_upload/4_3_4_Weltverbrauch.pdf, verfügbar am
15.04.2009

Hans Künz GmbH: Abbildung Elektrolysekran. URL:
<http://www.kuenz.com>, verfügbar am 28.04.2009

Kern GmbH: Datenblätter zu PA 6, PA 6 GF 30, PA 66, POM-C, PPS GF 40, PE-HD, PE-UHMW. URL:
<http://www.kern-gmbh.de/>, verfügbar am 15.04.2009

Kunststoff-Web: Kunststoffe. URL:
<http://www.kunststoffweb.de/wiki/index.php?title=Kunststoff>, verfügbar am 01.11.2008

PlasticsEurope Deutschland e.V.: Kunststoff-global. URL:
<http://www.vke.de/de/markt/kunststoffglobal/index.php?PHPSESSID=f74a19317e96b9ac0e62627fc656b92b>, verfügbar am 15.04.2009

Svařák Magazin 2009: Kunststoffspritzen. URL:
http://welding.svarak.cz/f/svarak/o/Kunststoffspritzen/Obr_2.gif

Wikipedia: Kunststoff. URL:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Kunststoff>, verfügbar am 10.10.2008

Erklärung:

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Röthis, 05.05.2009
